



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN DAN PEMODELAN FINITE
ELEMENT MATERIAL POLYSTYRENE UNTUK IMPACT
ATTENUATOR KENDARAAN SAPUANGIN SPEED**

**NAJIHUN GHULAM HALIM
NRP 2111 100 143**

**Dosen Pembimbing
Dr. Eng. SUTIKNO, ST., MT.**

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**



TUGAS AKHIR - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY AND FINITE ELEMENT
MODELLING OF POLYSTYRENE FOR IMPACT
ATTENUATOR ON SAPUANGIN SPEED**

**NAJIHUN GHULAM HALIM
NRP 2111 100 143**

**Dosen Pembimbing
Dr. Eng. SUTIKNO, ST., MT.**

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016**

**STUDI EKSPERIMEN DAN PEMODELAN *FINITE
ELEMENT* MATERIAL *POLYSTYRENE* UNTUK
IMPACT ATTENUATOR KENDARAAN SAPUANGIN
SPEED**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik pada Bidang Studi Metalurgi Program Studi S-I
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

NAJIHUN GHULAM HALIM

NRP. 2111 100 143

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Sutikno, ST., MT. (Pembimbing)
NIP. 19740703 200003 1 001
2. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc (Penguji I)
NIP. 19630314 198803 1 002
3. Wahyu Wijanarko, ST., MSc. (Penguji II)
NIP. 19820209 201212 1 001
4. Indra Sidharta, ST, MSc. (Penguji III)
NIP. 19800619 200604 1 004

**SURABAYA
JANUARI, 2016**

STUDI EKSPERIMEN DAN PEMODELAN FINITE ELEMENT MATERIAL POLYSTYRENE UNTUK IMPACT ATTENUATOR KENDARAAN SAPUANGIN SPEED

Nama Mahasiswa : Najihun Ghulam Halim
NRP : 2111 100 143
Jurusan : Teknik Mesin FTI ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Sutikno, ST., MT.

Abstrak

Student Formula Japan merupakan kompetisi balap otomotif yang diadakan oleh Society of Automotive Engineering setiap tahunnya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember sebagai kampus teknik terbaik di Indonesia telah mengikuti kompetisi tersebut selama 2 tahun terakhir. Melalui kendaraan yang diberi nama Sapuangin Speed, ITS berhasil mendapatkan gelar Best Rookie Award pada tahun 2013. Namun pada tahun 2014, prestasi terbaik yang diraih hanya kenaikan peringkat. Berbagai evaluasi pun muncul, salah satunya terkait berat kendaraan dan impact attenuator merupakan salah satu komponen kendaraan yang tergolong berat. Impact attenuator adalah komponen pada Sapuangin Speed yang berfungsi sebagai peredam kejut dan pelindung dari bagian depan kendaraan.

Penelitian ini diawali dengan studi tentang material polystyrene dan impact attenuator. Adapun untuk pengambilan data menggunakan 2 metode yaitu studi eksperimen dan pemodelan pada software finite element. Terdapat empat model geometri yang dievaluasi dan kemudian didapatkan bahwa geometri piramida terpancung merupakan geometri yang paling aman. Geometri ini kemudian dievaluasi lanjut melalui pengujian eksperimen dan simulasi pada software finite element. Metode pengujian eksperimen yang digunakan adalah pengujian tekan (quasi-static). Sedangkan simulasi yang dilakukan menyesuaikan dengan pengujian eksperimen.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan impact attenuator yang terbuat dari material polystyrene dengan geometri piramida terpancung memiliki kemampuan menyerap energi yang tinggi. Pada simulasi, jumlah energi yang dapat diserap sebesar 12405 J, sedangkan pada pengujian eksperimen jumlah energi yang dapat diserap sebesar 12403.1 J. Perlambatan maksimum yang terjadi pada impact attenuator ini sebesar 3.75 g's dan rata-rata perlambatan sebesar 0.36 g's (pada regulasi Student Formula Japan disebutkan bahwa perlambatan yang terjadi pada impact attenuator maksimum sebesar 40 g's dan rata-rata maksimum yang diizinkan sebesar 20 g's). Defleksi yang terjadi pada anti-intrusion plate sebesar 15 mm saat dilakukan pengujian eksperimen dan 5.8 mm saat dilakukan simulasi (pada regulasi Student Formula Japan defleksi maksimum yang diizinkan terjadi pada anti-intrusion plate sebesar 1 inch atau 25.4 mm).

Kata Kunci: impact attenuator, polystyrene, quasi-static, Student Formula Japan

STUDI EKSPERIMEN DAN PEMODELAN FINITE ELEMENT MATERIAL POLYSTYRENE UNTUK IMPACT ATTENUATOR KENDARAAN SAPUANGIN SPEED

Nama Mahasiswa : Najihun Ghulam Halim
NRP : 2111 100 143
Jurusan : Teknik Mesin FTI ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Sutikno, ST., MT.

Abstrak

Student Formula Japan is an annual automotive competition held by Society of Automotive Engineering. Institut Teknologi Sepuluh Nopember as one of the best university in Indonesia have been compete on Student Formula Japan since 2013 with the car named as Sapuangin Speed. The best achievement is Best Rookie Award in 2013. Unfortunately in 2014, the team only got rise of start number as result. There are some evaluations after the result, one of them is about the weight of vehicle and impact attenuator is one of the vehicle parts that overweight. Impact attenuator has a function as safety protector for driver on the front of vehicle.

This research started by study of polystyrene and impact attenuator. This research was performed experimentally test and modelling on finite element software. There are four geometry of impact attenuators that have been evaluated and give that unfinished pyramid is the safest geometry. After that, this geometry has been evaluated again with the experimentally test and simulation on finite element software. The experimentally test method is compress test (quasi-static). Meanwhile the process of simulation was based by experimentally test.

The result of this research is impact attenuator made by polystyrene with unfinished pyramid as its geometry has high energy absorption ability. On the simulation, impact attenuator can absorb energy on 12405 J level and on experimentally test its

showed 12403.1 J. The maximum deceleration is 3.75 g's and the average deceleration is 0.36 g's (on the Student Formula Japan regulation, the maximum deceleration limit is 40 g's and the average deceleration limit is 20 g's). The deflection on anti-intrusion plate is 15 mm as the result of experimentally test and 5.8 mm as the result of simulation process (the limit on Student Formula Japan regulation is 1 inch or 25.4 mm)

Keywords: impact attenuator, polystyrene, quasi-static, Student Formula Japan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penyusunan laporan tugas akhir yang berjudul **“STUDI EKSPERIMEN DAN PEMODELAN *FINITE ELEMENT* MATERIAL *POLYSTYRENE* UNTUK *IMPACT ATTENUATOR* KENDARAAN SAPUANGIN SPEED “** ini dapat diselesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh untuk memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Banyak pihak yang telah membantu sampai selesainya tugas akhir ini. Oleh karena itu pada kesempatan ini disampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Kawito, Ibu Ronik Wahyuliningsih, Mbak Bahairotul Lu'lu', Dek Nafsa Rahima Nuran, Mas Achmad Zainul Fanani, Dek Keisha Kamila Achmad, Dek Ifah untuk segala doa, restu, pengorbanan, kesabaran dan motivasi yang tidak pernah bosan dan habis kepada penulis.
2. **Dr. Eng. Sutikno, ST., MT.** selaku dosen pembimbing tugas akhir ini. Terima kasih untuk semua waktu, kritik, saran, dan motivasi yang diberikan di tengah – tengah kesibukan Bapak. Semoga semua yang telah Bapak berikan tercatat sebagai amalan yang tak pernah putus serta pembuka pintu rezeki yang akan datang.
3. **Ir. Witantyo, MSc.Eng. , Indra Sidharta, ST., M.Sc.** dan **Wahyu Wijanarko, ST., M.Sc.** selaku dosen penguji tugas akhir. Terimakasih atas nasehat-nasehatnya.
4. Clarissa Suroso, terima kasih atas segala pengertiannya dan semoga cepat menyusul.
5. Pitung, Ateng, Tohir, Gjx, Mamet, Jablay, Opay, Vikbet, Hisyam, Gopel, Ambon, Satpam, Gopar, Said, Om, Cakpor,

Nabil, Oci, Kombet, Pakgay, Brahmandul, Hasfos, Moreng, Pentol. Sampai jumpa 24 tahun lagi di LBMM.

6. Seluruh keluarga besar **M54, Lab Metalurgi** dan teman-teman di mesin atas kebahagiaan dan dukungannya.
7. Bapak dan Ibu dosen serta seluruh karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS yang telah banyak membantu selama perkuliahan.
8. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih atas bantuan, saran, doa, dan semangatnya.

Penulis sadar bahwa penulisan tugas akhir ini memiliki banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan dan kesempurnaan tugas akhir ini. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi penulis dan pembaca. Terima kasih.

Surabaya, 23 Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL (Versi Bahasa Indonesia)	
HALAMAN JUDUL (Versi Bahasa Inggris)	
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori	14
2.2.1 <i>Impact Attenuator</i>	14
2.2.2 Komposit	17
2.2.3 Polimer	19
2.2.3.1 <i>Polystyrene</i>	20
2.2.3.2 High-Impact Polystyrene (HIPS)	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2 Metodologi Penelitian	26
3.2.1 Studi Literatur	26
3.2.2 Simulasi Pengujian.....	27
3.2.2.1 Proses Penentuan Geometri <i>Impact Attenuator</i>	27
3.2.2.2 Proses Input Data Material.....	29
3.2.2.3 Proses Modelling.....	30
3.2.3 Pengujian Eksperimen	31
3.2.3.1 Peralatan dan Bahan	31

3.2.3.2 Langkah-langkah Pengujian.....	33
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Penentuan Model dan Geometri <i>Impact Attenuator</i>	35
4.2 Hasil Pengujian Eksperimen <i>Impact Attenuator</i>	38
4.3 Hasil Simulasi <i>Impact Attenuator</i>	42
4.4 Komparasi Hasil Pengujian Eksperimen dan Simulasi	48
4.5 Studi Lanjut <i>Impact Attenuator</i> dengan Material <i>Polystyrene</i> dan Geometri Piramida Terpancung	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	59
BIODATA PENULIS	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Rekam jejak impact attenuator kendaraan Sapuagin Speed	2
Gambar 2.1 Geometri <i>square frusta</i> untuk <i>impact attenuator</i>	5
Gambar 2.2 Hasil pengujian eksperimen <i>impact attenuator</i> dengan material aluminium	7
Gambar 2.3 Hasil pengujian eksperimen <i>impact attenuator</i> dengan material komposit.....	7
Gambar 2.4 Pemodelan <i>finite element</i> untuk <i>impact attenuator</i> ...	9
Gambar 2.5 Gambar <i>impact attenuator</i> model A, B, C dan D ..	12
Gambar 2.6 Regulasi <i>impact attenuator</i> pada <i>Student Formula Japan</i>	15
Gambar 2.7 Letak impact attenuator pada kendaraan formula..	16
Gambar 2.8 Komponen pada mesin pesawat yang terbuat dari komposit	19
Gambar 2.9 struktur polimer, (a) linear, (b) <i>branched</i> , (c) <i>cross linked</i> , (d) <i>network</i>	20
Gambar 2.10 Proses polimerisasi dari monomer <i>styrene</i> menjadi <i>polystyrene</i>	21
Gambar 2.11 Tipe-tipe <i>copolymer</i>	21
Gambar 2.12 Kurva tegangan-regangan untuk <i>polystyrene</i> dan <i>high-impact polystyrene</i>	22
Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian	25
Gambar 3.2 Impact attenuator dengan geometri balok	28
Gambar 3.3 Impact attenuator dengan geometri tabung	28
Gambar 3.4 <i>Impact attenuator</i> dengan geometri prisma segidelapan	28
Gambar 3.5 Impact attenuator dengan geometri piramida terpancung	29
Gambar 3.6 Proses <i>meshing</i> keempat geometri <i>impact attenuator</i>	30
Gambar 3.7 Proses pemberian <i>pressure</i> pada keempat geometri <i>impact attenuator</i>	31
Gambar 3.8 Mesin uji tarik-tekan Shimadzu UH-I 500kH	32

Gambar 3.9 Skema pengujian eksperimen <i>quasi-static</i>	34
Gambar 4.1 Hasil simulasi pemilihan geometri <i>static structural</i> untuk <i>impact attenuator</i> dengan geometri balok ...	36
Gambar 4.2 Hasil simulasi pemilihan geometri <i>static structural</i> untuk <i>impact attenuator</i> dengan geometri tabung..	36
Gambar 4.3 Hasil simulasi pemilihan geometri <i>static structural</i> untuk <i>impact attenuator</i> dengan geometri prisma segidelapan	37
Gambar 4.4 Hasil simulasi pemilihan geometri <i>static structural</i> untuk <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung	37
Gambar 4.5 Grafik gaya vs waktu saat pengujian eksperimen <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung	39
Gambar 4.6 Nilai deakselerasi tiap detik saat pengujian eksperimen <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung.....	40
Gambar 4.7 Retakan yang terjadi pada <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung saat pengujian eksperimen.....	41
Gambar 4.8 Deformasi yang terjadi <i>anti-intrusion plate</i> setelah dilakukan pengujian eksperimen pada <i>impact</i> <i>attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung .	41
Gambar 4.9 <i>Meshing impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung untuk proses simulasi.....	42
Gambar 4.10 Proses pemberian gaya pada <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung saat proses simulasi	43
Gambar 4.11 Proses penyerapan energi pada <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung selama proses simulasi berlangsung	44
Gambar 4.12 Nilai deakselerasi tiap detik pada <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancungsaat proses simulasi.....	44

Gambar 4.13 Nilai tegangan ekuivalen <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung setelah proses simulasi	46
Gambar 4.14 Nilai deformasi pada <i>anti-intrusion plate impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung setelah proses simulasi.....	46
Gambar 4.15(a) Letak tegangan ekuivalen maksimum pada simulasi (b) Bentuk <i>impact attenuator</i> setelah dilakukan pengujian.....	49
Gambar 4.16 (a) Deformasi <i>anti-intrusion plate</i> pada saat simulasi (b) Deformasi <i>anti-intrusion plate</i> pada saat pengujian eksperimen	50
Gambar 4.17 Proses pemberian gaya pada <i>impact attenuator</i> dengan dimensi $17 \times 22 \times 10$ cm untuk studi lanjut	51
Gambar 4.18 Proses penyerapan energi selama simulasi berlangsung pada <i>impact attenuator</i> dengan dimensi $17 \times 22 \times 10$ cm untuk studi lanjut.....	52
Gambar 4.19 Proses pemberian gaya pada <i>impact attenuator</i> dengan dimensi $20 \times 20 \times 10$ cm untuk studi lanjut	53
Gambar 4.20 Proses penyerapan energi selama simulasi berlangsung pada <i>impact attenuator</i> dengan dimensi $20 \times 20 \times 10$ cm untuk studi lanjut.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rancangan pada penelitian	6
Tabel 2.2 <i>Mechanical properties</i> komposit dengan matriks epoxy resin.....	8
Tabel 2.3 Hasil pengujian analitik, numerik dan eksperimen....	10
Tabel 2.4 Hasil pengujian eksperimen <i>impact attenuator</i>	13
Tabel 2.5 Sifat mekanik <i>high-impact polystyrene</i>	23
Tabel 3.1 Properti <i>polystyrene</i>	29
Tabel 3.2 Properti <i>aluminium</i> 6061	29
Tabel 3.3 Jumlah elemen dan noda pada masing-masing geometri	30
Tabel 4.1 Dimensi tiap <i>impact attenuator</i>	35
Tabel 4.2 Hasil evaluasi <i>static structural impact attenuator</i>	38
Tabel 4.3 Hasil pengujian eksperimen <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung.....	42
Tabel 4.4 Hasil simulasi <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung	47
Tabel 4.5 Komparasi hasil pengujian eksperimen dan simulasi <i>impact attenuator</i> geometri piramida terpancung.....	48
Tabel 1 Hasil pengujian eksperimen <i>impact attenuator</i> dengan geometri piramida terpancung.....	59



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

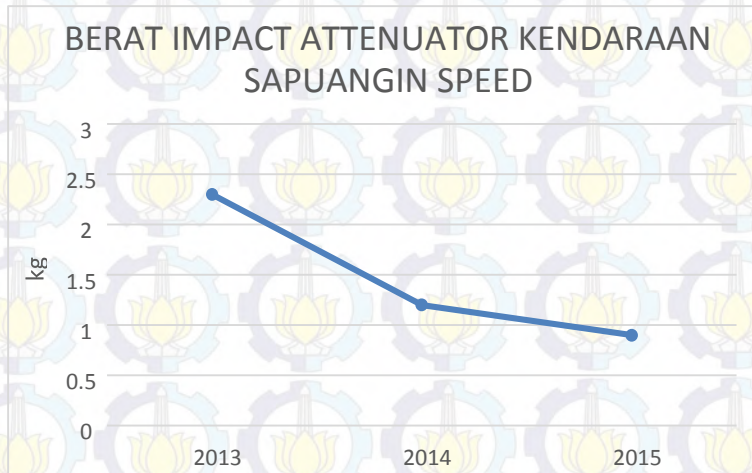
1.1 Latar Belakang Masalah

Polimer adalah rantai berulang dari atom yang panjang, terbentuk dari pengikat yang berupa molekul identik yang disebut monomer. Sejak ditemukan pertama kali pada tahun 1833 oleh kimiawan Swedia, Berzelius, ilmu pengetahuan tentang polimer terus dikembangkan hingga kini. Dewasa ini, penggunaan polimer banyak sekali dijumpai di masyarakat karena beberapa keunggulannya, yaitu: tidak menghantarkan panas dan listrik, ringan dan memiliki *stiffness* yang tinggi. Beberapa contoh penggunaan polimer dalam kehidupan sehari-hari adalah kantong plastik untuk belanja, plastik pembungkus makanan dan minuman, kemasan plastik, alat-alat listrik, alat-alat rumah tangga, dan alat-alat elektronik.

Dalam dunia balap otomotif, penggunaan polimer sebagai salah satu aspek penting perancangan kendaraan telah sejak lama diterapkan. Seiring berjalannya waktu, teknologi polimer untuk kendaraan semakin berkembang. Dimulai dari *cover* mesin kendaraan, kemudian merambah kipas radiator dan yang terakhir teknologi polimer diterapkan pada *bumper* ataupun *impact attenuator*. *Bumper* ataupun *impact attenuator* sendiri merupakan salah satu komponen penting dalam kendaraan balap otomotif karena berfungsi sebagai salah satu pelindung pengemudi.

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS) sebagai salah satu perguruan tinggi negeri berbasis teknologi terbaik di Indonesia telah 3 tahun turut andil dalam perancangan kendaraan balap otomotif. Melalui kendaraan yang diberi nama Sapuangan Speed, ITS merancang dan mengembangkan kendaraan balap otomotif untuk mengikuti kompetisi *Student Formula Japan* tiap tahunnya. Kompetisi yang diikuti oleh tim-tim dari perguruan tinggi ternama di seluruh Asia tersebut menuntut tiap partisipan untuk menciptakan kendaraan balap *formula* dengan tingkat efisiensi yang tinggi. Sepanjang partisipasinya, raihan tertinggi

yang pernah dicapai oleh kendaraan Sapuangin Speed adalah *Best Rookie Award* pada tahun 2013.



Gambar 1.1 Rekam jejak *impact attenuator* kendaraan Sapuangin Speed

Banyak hal yang kemudian menjadi evaluasi dari kendaraan tersebut, salah satunya adalah berat kendaraan. Dari sekian banyak komponen kendaraan, *impact attenuator* adalah salah satu komponen yang tergolong berat. Evaluasi dari *impact attenuator* yang digunakan pada Sapuangin Speed memiliki kekuatan dan ketangguhan yang baik, namun berat yang dimiliki masih besar. *Impact attenuator* Sapuangin Speed masih menggunakan aluminum. Gambar 1.1 di atas menunjukkan rekam jejak berat *impact attenuator* kendaraan Sapuangin Speed dari tahun 2013 – 2015. Tren grafik menunjukkan bahwa berat *impact attenuator* terus menerus berkurang.

Penelitian mengenai penggunaan material alternatif untuk *impact attenuator* kendaraan sudah pernah dilakukan sebelumnya. Simonetta Boria dan Silvia Pettinari melakukan penelitian

mengenai perbandingan desain *impact attenuator* untuk kendaraan listrik dengan menggunakan material *metallic* dan komposit [3]. Jovan Obradovic, Simonetta Boria dan Giovanni Belingardi melakukan penelitian mengenai desain dan analisa *crash* struktur komposit untuk penyerapan energi pada *frontal impact* [4]. Akmal Irfan Majid, Ahmad Ghazi Arijuddin, Budi Santoso dan IGB Budi Dharma melakukan penelitian tentang berbagai geometri untuk *impact attenuator* [6]. Aplikasi *impact attenuator* terbuat dari komposit dapat menurunkan berat namun tetap kaku dan kuat, sehingga efisiensi kendaraan dapat meningkat. Sedangkan penelitian tentang aplikasi *impact attenuator* terbuat dari polimer belum pernah dilakukan sebelumnya. Oleh karena itu pada perancangan Sapuangin Speed perlu dilakukan penelitian terhadap *impact attenuator*, desain *impact attenuator* yang diterapkan untuk Sapuangin Speed menyesuaikan regulasi *Student Formula Japan* dan jenis material yang dipakai adalah *polystyrene*.

1.2 Rumusah Masalah

Impact attenuator merupakan komponen keselamatan yang dipasang pada kendaraan Sapuangin Speed. Bertempat di bagian moncong kendaraan, komponen ini berfungsi sebagai pelindung pengemudi dari benturan di bagian depan. Namun *impact attenuator* yang terdapat saat ini masih tergolong berat. Adapun material yang digunakan masih aluminium. Penggunaan material *polystyrene* sebagai *impact attenuator* kendaraan Sapuangin Speed belum pernah dilakukan. Material *polystyrene* meskipun memiliki kekuatan yang lebih rendah, namun nilai ketangguhannya lebih tinggi daripada aluminium. Selain itu, penelitian mengenai penggunaan *polystyrene* sebagai *impact attenuator* juga belum pernah dilakukan sebelumnya.

Dalam penelitian ini, kemampuan *impact attenuator* dengan material *polystyrene* pada Sapuangin Speed dalam menerima beban dalam pengujian *quasi-static* akan dievaluasi. Selain itu, kesesuaian desain dengan ketentuan dan persyaratan

yang tertera pada regulasi *Student Formula Japan* dan berat *impact attenuator* juga akan dievaluasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Desain *impact attenuator* yang berat akan memengaruhi efisiensi dari kendaraan. Oleh karena itu, pemilihan material yang ringan namun tetap mampu menerima beban sangat diperlukan. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan *impact attenuator* yang baik, ringan dan sesuai untuk diterapkan pada kendaraan Sapuangin Speed. Untuk mencapai hal tersebut, *impact attenuator* yang terbuat dari material *polystyrene* ini harus memiliki kemampuan menyerap energi yang tinggi. Selain itu, *impact attenuator* juga harus sesuai dengan regulasi *Student Formula Japan* agar dapat diterapkan pada kendaraan Sapuangin Speed.

1.4 Batasan Masalah

Agar penulisan ini dapat mencapai tujuan yang diinginkan, maka batasan masalah yang akan diberikan adalah sebagai berikut:

1. Desain dan geometri dari *impact attenuator* mengacu pada regulasi *Student Formula Japan*.
2. Proses pengambilan data sesuai dengan metode pengujian *quasi-static*.

1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat dari penulisan ini adalah dapat digunakan sebagai referensi pembandingan dalam merancang *impact attenuator* Sapuangin Speed.

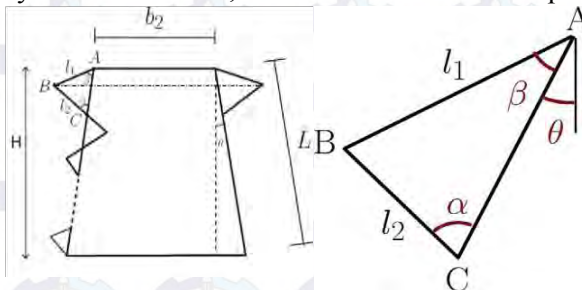
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada tahun 2014 Simonetta Boria dan Silvia Pettinari melakukan penelitian dengan judul “*Mathematical Design of Electrical Vehicle Impact Attenuator*”. Penelitian ini membahas mengenai desain matematis *impact attenuator* dengan material dasar aluminum dan komposit. Lebih lanjut dalam penelitian ini dibahas tentang pengaruh dari masing-masing desain terhadap kemampuan menerima beban dinamis, yaitu momen *bending* [3].

Oleh Simonetta Boria dan Silvia Pettinari, geometri *impact attenuator* yang dipilih untuk diteliti lebih lanjut adalah model *square frusta*. Dipilihnya model tersebut dikarenakan *square frusta* sebelumnya telah dianalisa keagalannya dan dapat dianalisa hingga 4 tipe kegagalan. Faktor-faktor yang mendukung diantaranya adalah dimensi, sifat material dan kondisi pengujian.



Gambar 2.1 Geometri *square frusta* untuk *impact attenuator* [3]

Untuk perhitungan momen *bending impact attenuator* dengan material aluminum, menggunakan rumusan:

$$(8b_2 \times M_0 \times n) + 8M_0 (l_1 + l_2) (2(n/2 + \theta) \sin \theta + \cos \theta) \dots (2-1)$$

Adapun untuk *impact attenuator* dengan material komposit, perhitungan momen *bending* dapat dilakukan melalui perumusan ini:

$$\sigma_0(b + 2h \tan \Theta) (t_i^2 \alpha_i + (t - t_i)^2 \times \alpha_e) \dots \dots \dots (2-2)$$

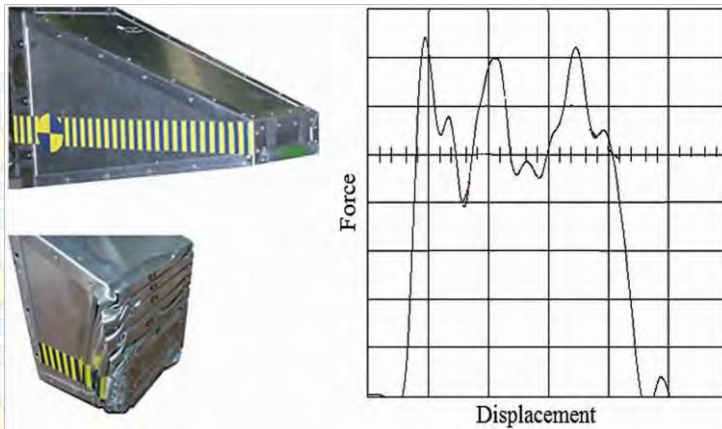
dimana t = tebal dinding

Ditinjau dari sifat materialnya, aluminum dan komposit memiliki perbedaan, diantaranya pada nilai tegangan dan massa jenisnya Untuk aluminum, nilai tegangannya adalah 260 MPa dan memiliki massa jenis sebesar 2700 kg/m³. Sedangkan untuk komposit, nilai tegangannya adalah 565 MPa dan memiliki massa jenis sebesar 1330 kg/m³. Tabel di bawah ini akan menunjukkan rancangan dalam penelitian tersebut:

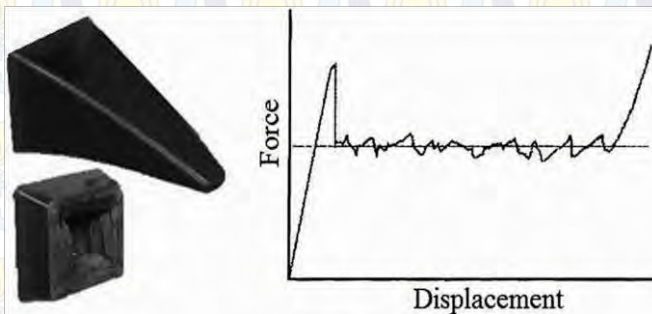
Tabel 2.1 Rancangan pada penelitian [3]

No.	b1 (mm)	b2 (mm)	H (mm)	Θ (mm)
1	500	429.6	400	5
2	500	359.2	400	10
3	500	285.6	400	15
4	500	429.6	400	5
5	500	359.2	400	10
6	500	285.6	400	15
7	500	429.6	400	5
8	500	359.2	400	10
9	500	285.6	400	15

Berdasarkan sifat materialnya pula, *impact attenuator* dengan material aluminum dan komposit memiliki perbedaan ketika dilakukan pengujian eksperimen. Hasil pengujian eksperimen tersebut dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 2.2 Hasil pengujian eksperimen *impact attenuator* dengan material aluminium [3]



Gambar 2.3 Hasil pengujian eksperimen *impact attenuator* dengan material komposit [3]

Berdasarkan nilai tegangan aluminium dan komposit dapat disimpulkan bahwa *impact attenuator* dengan material komposit lebih baik jika dibandingkan dengan *impact attenuator* dengan bahan aluminium. Kemudian apabila ditinjau dari hasil pengujian eksperimen, *impact attenuator* dengan bahan komposit lebih baik

dibandingkan aluminum karena dapat diberikan gaya lebih besar di akhir perubahan dimensinya.

Pada penelitian tersebut didapatkan beberapa kekurangan, diantaranya adalah tidak diketahuinya jumlah energi yang dapat diserap oleh *impact attenuator*. Selain itu, spesimen yang digunakan sebagai *impact attenuator*, baik aluminum maupun komposit bukan merupakan benda pejal. Sehingga masih terdapat kemungkinan gaya yang dapat diberikan di akhir perubahan dimensinya lebih besar.

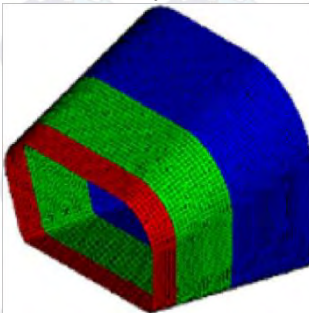
Sebelumnya pada tahun 2011, Jovan Obradovic, Simonetta Boria dan Giovanni Belingardi melakukan penelitian yang berjudul “*Lightweight Design and Crash Analysis of Composite Frontal Impact Energy Absorbing Structures*”. Penelitian ini membahas tentang desain dan analisis dari *frontal impact* berbahan komposit dalam penyerapan energi. Adapun komposit yang digunakan adalah serat karbon dengan matriks resin epoxy sebesar $42 \pm 3\%$ [4]. Alasan pemilihan material tersebut adalah sifat ketahanan terhadap *impact* yang baik. Adapun *properties* material tersebut sebagai berikut:

Tabel 2.2 *Mechanical properties* komposit dengan matriks epoxy resin [4]

Properties	Composite CFS003/LTM 25 carbon-epoxy pabric prepeg
Density	$1.45 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$
Young Modulus in fibre longitudinal direction	53.6 GPa
Young Modulus in transverse direction	55.2 GPa
Poisson's ratio	0.042
Shear modulus	2.85 GPa
Longitudinal tensile strength	0.618 GPa
Transverse tensile strength	0.652 GPa

Longitudinal compressive strength	0.642 GPa
Transverse compressive strength	0.556 GPa
Compressive strength	0.084 GPa
In plane shear strength	0.084 GPa

Material tersebut kemudian dilakukan pengujian secara eksperimen dan numerical dalam bentuk *impact attenuator*. Adapun geometri *impact attenuator* yang dipilih adalah *truncated pyramidal structure* dengan bentuk dasar hampir menyerupai persegi panjang. Dipilihnya geometri tersebut dengan alasan lebih stabil ketika dilakukan proses *crash test* dan bentuk dasarnya mampu meminimalisasikan adanya konsentrasi tegangan.



Gambar 2.4 Pemodelan *finite element* untuk *impact attenuator* [4]

Berdasarkan gambar 2.4 di atas, proses pengujian secara numeric menggunakan desain *impact attenuator* yang terbagi dalam 3 zona:

- Zona pertama (warna merah)
 - panjang : 30 mm
 - ketebalan : 0.8 mm
 - jumlah ply : 4
- Zona kedua (warna hijau)
 - panjang : 70 mm
 - ketebalan : 1.3 mm
 - jumlah ply : 6

- Zona ketiga (warna biru)
 - panjang : 100 mm
 - ketebalan : 1.4 mm
 - jumlah ply : 7

Geometri yang ada kemudian dianalisa kembali sebelum dilakukan pengujian. Model *truncated pyramidal structure* dirasa terlalu kompleks dan dapat direpresentasikan dalam model *tube* ketika dilakukan pengujian. *Tube* yang akan diuji memiliki diameter 50 dan 80 mm dengan variasi ketebalan 1.5 – 2.5 mm. Pada pengujian numerik, *impactor* bergerak menuju *impact attenuator* dalam bentuk *moving rigid wall* dengan massa 294 kg dan kecepatan di sekitar 4 m/s. Sedangkan pada pengujian eksperimen, *impact attenuator* diuji pada mesin *drop weight test* dengan ketinggian 6 meter dan massa maksimum 413 kg. Pada saat dilakukan pengujian, massa *impactor* pada mesin tersebut adalah 294 kg dengan kecepatan di sekitar 4 m/s. Tabel di bawah akan menampilkan hasil pengujian *impact attenuator* tersebut.

Tabel 2.3 Hasil pengujian analitik, numerik dan eksperimen [4]

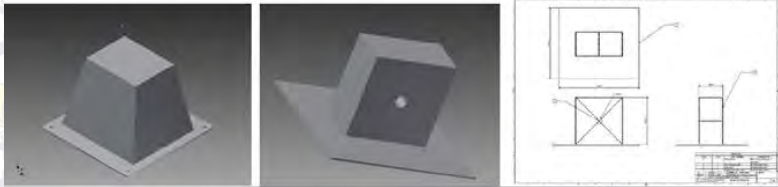
diameter – thickness (mm)	Analytical model		Finite element model		Experiment model	
	energy absorbed (kJ)	crash (mm)	energy absorbed (kJ)	crash (mm)	energy absorbed (kJ)	crash (mm)
80 – 2.5	2.05	31	2.01	38	2.02	35
80 – 2	2.05	39	2.01	45	1.96	44
80 – 1.5	2.35	87	2.01	87	2.35	85
50 – 2.5	2.22	49	2.01	53	2.24	54
50 – 2	2.61	73	2.47	82	2.59	80
50 – 1.5	2.58	140	2.01	132	2.59	127

Pada penelitian di atas didapatkan beberapa kekurangan diantaranya adalah model *impact attenuator* yang didesain pada *software* terlalu sulit untuk proses manufakturnya. Sehingga diperoleh geometri lain yang dianggap dapat merepresentasikan model tersebut. Selain itu, proses pengambilan data melalui *finite element method* juga tidak dijelaskan. Adapun besarnya gaya yang diberikan pada saat pengujian analitik dan eksperimen juga tidak ditampilkan.

Pada tahun 2012, Akmal Irfan Majid, Ahmad Ghazi Arijuddn, Budi Santoso dan IGB Budi Dharma melakukan penelitian yang berjudul “Perancangan dan Pengujian Piranti Keselamatan Berkendara *Impact Attenuator* Pada Mobil Student Formula 600cc Bimasakti-UGM” [6]. Penelitian tersebut membahas tentang hasil pengujian *impact attenuator* dengan empat model yang berbeda. Keempat model tersebut adalah:

1. Model A : *Attenuator* Piramida berbahan dasar aluminium tebal 3 mm dengan dimensi: tinggi 23,5 cm, ukuran persegi panjang kecil atas 20 cm x 15,5 cm dan ukuran persegi panjang bawah 35 cm x 35 cm.
2. Model B : *Attenuator* berbentuk balok berbahan dasar aluminium tebal 1,5 mm dengan dimensi : tinggi 20 cm, lebar 20 cm, dan panjang 10 cm. Di dalam *attenuator* diberikan *polyurethane foam*. Konstruksi baut berada di tiap-tiap ujung pinggir *anti-intrusion plate* berjumlah 4 buah.
3. Model C : *Attenuator* berbentuk balok berbahan dasar aluminium tebal 1,5 mm dengan dimensi : tinggi 20,5 cm, lebar 20,5 cm, dan panjang 10,5 cm. Di dalam *attenuator* diberikan *polyurethane foam*. Konstruksi baut berada di tiap-tiap ujung pinggir *anti-intrusion plate* berjumlah 4 buah.
4. Model D : *Attenuator* berbentuk balok berbahan dasar aluminium tebal 2 mm dengan dimensi : tinggi 20,5 cm, lebar 10,5 cm, dan panjang 10,5 cm. Di dalam *attenuator*

diberikan *polyurethane foam*. Konstruksi baut berada di tiap-tiap ujung pinggir *anti-intrusion plate* berjumlah 8 buah yakni masing-masing diberi 2 buah di ujung. Diberikan tambahan plat 2 mm berbentuk menyilang diagonal (konstruksi X) di tengah.



(a) Model A

(b) Model B dan C

(c) Model D

Gambar 2.5 Gambar *impact attenuator* model A, B, C dan D [6]

Peneliti menggunakan *anti-intrusion plate* berbahan dasar aluminium dengan ketebalan 5 mm. Dimensi disesuaikan dengan bentuk *front bulkhead* pada rangka sekitar 28 cm x 37 cm. Antara dasar mesin tekan dengan *anti-intrusion plate* dan *impact attenuator* diberikan jarak 2,5 inch sesuai regulasi, untuk mengukur defleksi plat yang terjadi. Perancangan dan manufakturisasi *attenuator* dilakukan bertempat di Laboratorium Teknologi Mekanik Jurusan Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik UGM. Adapun untuk pengujian *attenuator* menggunakan mesin tekan (alat press) Shimadzu Universal Testing Machine (UTM) dengan metode *quasi-static* yang dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, mempertimbangkan ketersediaan alat dengan dimensi besar ruangan uji yang mampu ditempati oleh *attenuator*. Dalam pembahasan perhitungan didapatkan sebuah parameter penghitungan dengan asumsi yang disyaratkan:

- o Massa = 300 kg
- o *Average Deceleration*: 20 g's dan tidak boleh lebih dari 40 g's
- o Peletakan *plate* minimum 50 mm (2 inch) dari *front bulkhead*
- o $g's = 9,8 \text{ m/s}^2$
- o Sehingga :

- $F_{\max} = 300 \text{ kg} \times (40 \times 9.8 \text{ m/s}^2) = 117600 \text{ kg m/s}^2$.
- $F_{\min} = 300 \text{ kg} \times (20 \times 9.8 \text{ m/s}^2) = 58800 \text{ kg m/s}^2$.

Tabel 2.4 Hasil pengujian eksperimen *impact attenuator* [6]

Kode Sampel	Total Energy Absorbed (Joule)	Deakselerasi		Defleksi Plat (mm)
		Peak (g's)	Rerata (g's)	
A	11263	30,8	19,71	36
B	4526	11	7,73	28
C	4033,97	14,17	7,88	30
D	7798	25,13	16,28	22

Hasil pengujian pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa *impact attenuator* dengan model A dan D memenuhi persyaratan terkait energi yang diserap (minimal sebesar 7350 J) dan nilai deakselerasi (maksimal sebesar 40 g's dan rata-rata maksimal sebesar 20 g's). Faktor yang menjadi pertimbangan selanjutnya adalah tingkat kemudahan dalam proses manufakturnya. Model D yang berbentuk balok dirasa lebih mudah dalam proses manufakturnya dibandingkan model A yang berbentuk piramida. Selain itu, pada model A dimensi dianggap terlalu besar dan dianggap dapat mengganggu bodi sehingga tidak disarankan memakai bentuk ini. Dimensi dan penempatan spesimen bentuk A dianggap dapat mengurangi aerodinamis bodi, karena bisa saja berpengaruh kepada *curve* dari “moncong” (nose) bodi, selain faktor estetika bentuk bodi juga.

Atas dasar itulah model D kemudian yang dipilih untuk dijadikan *impact attenuator*. Aspek lain yang juga dibahas pada penelitian ini adalah penambahan plat dengan bentuk X dari aluminium 2 mm. Pada model D, penambahan plat tersebut dilakukan pada bagian dalam *impact attenuator*. Sehingga terdapat dua komponen penyusun *impact attenuator* yaitu *polyurethane*

foam dan plat aluminium berbentuk X. Dengan adanya plat penguat tersebut terbukti dapat memberikan efek serapan energi yang lebih.

Namun, beberapa kekurangan ditemukan pada penelitian ini, diantaranya dimensi pada tiap-tiap model *impact attenuator* yang dianalisa berbeda. Perbedaan ini mengakibatkan setiap model memiliki volume dan massa yang berbeda. Dampaknya adalah jumlah energi yang diserap, perlambatan dan defleksi pada plat yang diperoleh tidak dapat dijadikan acuan ataupun perbandingan karena tidak ada variabel yang sama.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Impact Attenuator*

Sesuai dengan namanya yang berarti pelemah gaya kejut, *impact attenuator* merupakan salah satu komponen yang penting pada kendaraan formula. Komponen ini terpasang pada bagian moncong kendaraan, tepatnya di bagian depan *bulkhead*. Fungsi *impact attenuator* adalah sebagai pelindung pengemudi ketika mengalami kecelakaan ataupun benturan di bagian depan kendaraan. Beragam regulasi pun dikeluarkan demi menjamin *impact attenuator* bekerja sesuai dengan fungsi yang diharapkan.

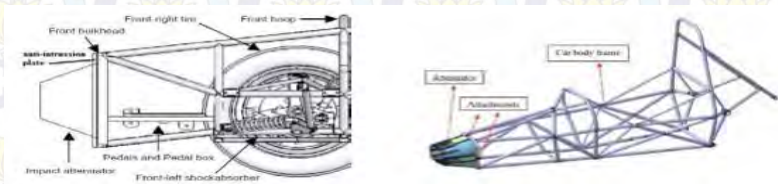
Pada kompetisi *Student Formula Japan*, *impact attenuator* yang didesain harus memenuhi kualifikasi sebagaimana gambar 2.6 di atas. *SAE International* telah mengeluarkan buku panduan aturan berjudul “*2012 Formula SAE International Rules*” berisi aturan-aturan tentang mobil formula yang akan dibuat, termasuk kriteria desain *impact attenuator* (aturan B.3.20). *Impact attenuator* harus memenuhi beberapa syarat-syarat sebagai berikut:

- Dipasang di depan *Front Bulkhead*.
- Panjang minimum 200 mm, tinggi minimum 100 mm, dan lebar minimum 200 mm.
- Untuk syarat fungsional, saat dipasang pada mobil formula, berat mobil maksimum 300 kg, kecepatan benturan 7 m/s, diharapkan menghasilkan rata-rata perlambatan mobil tidak melebihi 20 G, dengan

- Dipasang di depan *Front Bulkhead*.
- Panjang minimum 200 mm, tinggi minimum 100 mm, dan lebar minimum 200 mm.
- Untuk syarat fungsional, saat dipasang pada mobil formula, berat mobil maksimum 300 kg, kecepatan benturan 7 m/s, diharapkan menghasilkan rata-rata perlambatan mobil tidak melebihi 20 G, dengan

perlambatan maksimum sebesar 40 G. Total energi yang harus mampu diserap minimal 7350 Joule.

- c. Apabila terjadi gaya impact, tidak akan mempenetrasi *front bulkhead*.
- d. Pengujian *quasi-static* diperbolehkan dalam pengujian *impact attenuator*.



Gambar 2.7 Letak *impact attenuator* pada kendaraan formula

Dalam proses *assembly* set piranti keamanan pelindung gaya *impact* diperlukan sebuah plat yang disebut *anti-intrusion plate* yang merupakan “pembatas” antara struktur *attenuator* dan bagian depan rangka yang disebut *front bulkhead*. Seperti telah dijelaskan melalui gambar 2.7, letak *anti-intrusion plate* berada di antara *attenuator* dan *front bulkhead*, dimana plat tersebut terintegrasi langsung dengan *attenuator* maupun bagian depan rangka (*front bulkhead*). *Anti-intrusion Plate* juga dikenal sebagai *IA (impact attenuator) plate*.

Menurut *FSAE International Rules* yang telah mengatur mengenai *anti-intrusion plate* bahwa pada semua mobil, haruslah memenuhi: material plat bisa berupa *solid steel* dengan minimum ketebalan 1,5 mm (0,060 in) atau berupa aluminium dengan minimum ketebalan 4,0 mm (0,157 in), *Anti-intrusion plate* harus terintegrasi kepada *impact attenuator*. Teknik pengintegrasian antara *anti-intrusion plate* dengan *front bulkhead* dapat berupa dengan baut maupun pengelasan. Jika pelat *IA* diintegrasikan dengan baut kepada *front bulkhead*, ukuran plat minimal harus memiliki ukuran yang sama dengan dimensi luar dari *front*

bulkhead (menutupi seluruh). Minimal digunakan empat baut dengan ukuran 8 mm dengan standar metrik 8.8 (5/16 inci SAE grade 5) untuk mengintegrasikan *anti-intrusion plate* dengan *front bulkhead*. Apabila diintegrasikan dengan pengelasan, maka setidaknya ukuran plat menutupi setengah dari diameter rangka pada *front bulkhead*.

Selanjutnya dalam proses pengujian terdapat variabel defleksi yang dibatasi, bahwa selama proses pengetesan, *impact attenuator* harus ikut dipasang dalam test, yang diasumsikan seperti kondisi asli ketika terpasang pada ujung depan kendaraan. Aturan ini mencakup penempatan *anti-intrusion plate* yang terpasang pada attenuator. Terdapat syarat khusus bahwa *anti-intrusion plate* tidak boleh mengalami defleksi permanen lebih dari 25.4 mm (1 inch) dari posisi awal. Pengujian *impact attenuator* dapat berupa *drop test* maupun *quasi static test*. Pada penelitian ini digunakan pengujian *quasi-static test* sesuai ketersediaan alat uji yang dapat digunakan. Dengan pengujian jenis *quasi-static*, set *impact attenuator* benda uji akan diuji dengan menambahkan beban terus menerus secara berkala sehingga didapat kerusakan akibat pembebanan benda uji.

2.2.2 Komposit

Komposit merupakan material multifase yang didapatkan dari kombinasi material yang berbeda untuk mendapatkan sifat mekanik yang tidak bisa didapatkan apabila material diaplikasikan secara individual [2]. Komponen-komponen penyusun komposit tetap bisa dibedakan secara makro dan memiliki sifat seperti sebelumnya. Material komposit banyak diaplikasikan karena memiliki kombinasi sifat yang tidak bisa didapatkan apabila menggunakan material konvensional seperti logam, polimer, maupun keramik.

Sifat komposit bervariasi dan tergantung pada berbagai macam faktor antara lain : jenis komponen yang dipilih, distribusi komponen, dan morfologi komponen.

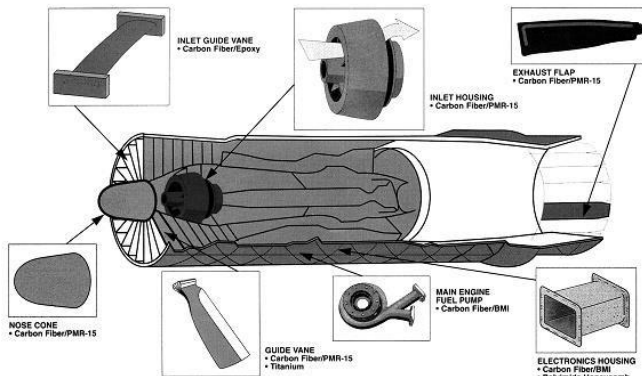
Ada beberapa kelebihan dari komposit apabila dibandingkan dengan material konvensional antara lain :

1. Material komposit mampu berperan menjadi bagian terintegrasi, misalnya satu komposit mampu menggantikan peran dari beberapa material logam.
2. Komposit memiliki *stiffness-to-density ratio* yang baik. Rasionalnya 1/5 dari baja dan 1/2 dari aluminium.
3. Komposit memiliki *strength-to-density ratio* yang baik. Dengan kelebihan ini pesawat maupun kendaraan bermotor bisa bergerak lebih cepat dengan efisiensi bahan bakar yang lebih baik. Kekuatan spesifiknya sekitar tiga hingga lima kali lebih baik jika dibandingkan dengan baja, oleh karena itu komponen pesawat terbang menggunakan komposit karena lebih ringan namun tetap kuat.
4. *Endurance limit* (*fatigue strength*) dari komposit baik. Untuk paduan aluminium maupun baja endurance limit berada pada 50% dari nilai *static strength*, sementara untuk *unidirectional carbon/epoxy composite* bisa mencapai 90% dari *static strength*. [19]

Komposit banyak diaplikasikan dalam dunia industri salah satunya adalah industri pesawat terbang. Komponen pesawat terbang harus memiliki *strength-to-density* yang baik, komponen harus ringan tapi kuat, dimana dengan berat yang sama komposit mampu menahan beban yang memiliki nilai lebih tinggi jika dibanding dengan baja agar pesawat mampu terbang dengan kinerja lebih baik.

Berikut ini contoh gambar aplikasi pada komponen penyusun mesin pesawat terbang yang terbuat dari komposit :

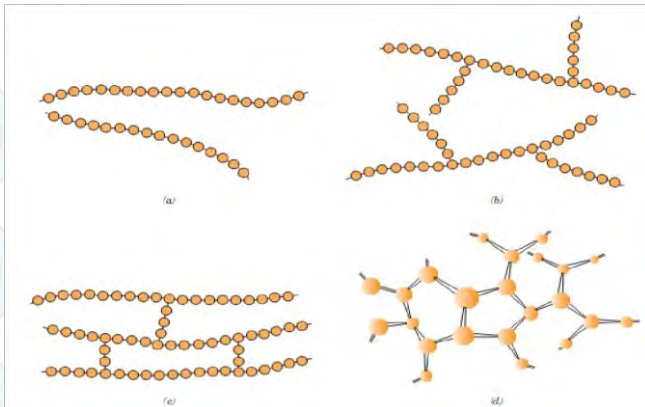
Engine Components



Gambar 2.8 Komponen pada mesin pesawat yang terbuat dari komposit[19].

2.2.3 Polimer

Kata polimer berasal dari bahasa Yunani *poly* yang berarti banyak dan *meros* yang berarti bagian. Polimer merupakan molekul panjang yang tersusun dari monomer-monomer yang terhubung dari ujung ke ujung [1]. Struktur polimer terdiri dari berbagai jenis yaitu linear, bercabang (*branched*), *cross-linked*, dan jaringan (*network*).



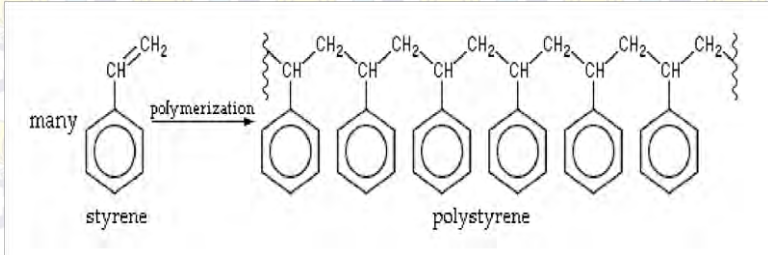
Gambar 2.9 struktur polimer, (a) linear, (b) *branched*, (c) *cross linked*, (d) *network* [1].

Ada dua jenis polimer yaitu polimer termoset dan polimer termoplastik. Polimer termoset merupakan polimer yang apabila dipanaskan hingga suhu tertentu akan membentuk susunan berupa *crosslink* yang tidak bisa dikembalikan seperti semula (*irreversible*). Contoh dari material polimer termoset adalah *epoxy*, *phenolics*, dan beberapa jenis poliester resin. Material polimer termoplastik dapat dipanaskan maupun didinginkan secara berulang-ulang, material ini lebih fleksibel jika dibandingkan dengan material termoset, contoh dari material termoplastik adalah polivinil klorida, polietilen, dan polistiren.

2.2.3.1 Polystyrene

Polystyrene (PS) merupakan salah satu jenis polimer termoset, yang tersusun dari monomer *styrene*. *Polystyrene* terbentuk sebagai akibat dari proses inter-koneksi dari monomer-monomer *styrene*. Proses pembuatan *polystyrene* umumnya melalui *injection molded*, *vacuum formed*, maupun *extruded*. Beberapa keunggulan dari *polystyrene* adalah tahan air, memiliki stabilitas dimensi yang tinggi dan *shrinkage* yang rendah. Adapun kelemahannya antara lain temperatur operasional yang rendah (<

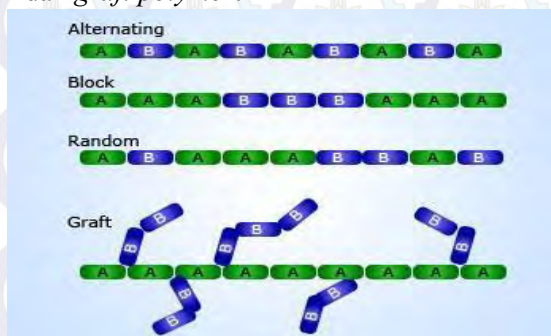
90°C) dan mudah terbakar. *Polystyrene* dapat diolah menjadi beberapa jenis produk, yaitu lembaran, *foam*, *expanded polystyrene* (EPS), *extruded polystyrene foam* (XPS) dan *high-impact polystyrene* (HIPS).



Gambar 2.10 Proses polimerisasi dari monomer *styrene* menjadi *polystyrene*.

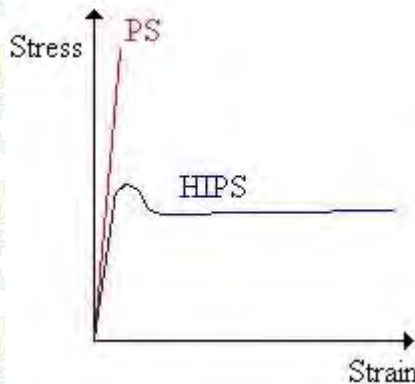
2.2.3.2 High-Impact Polystyrene (HIPS)

High-impact polystyrene (HIPS) merupakan salah satu produk dari *polystyrene* yang telah melalui proses polimerisasi lanjut. Produk HIPS ini termasuk dalam klasifikasi *copolymer*. *Copolymer* merupakan salah satu perkembangan dalam ilmu logam yang dimaksudkan agar lebih mudah dan ekonomis saat proses fabrikasinya, disamping nilai properti yang meningkat tentunya. Berdasarkan proses polimerisasinya, *copolymer* dibagi menjadi 5 klasifikasi, yaitu *random copolymer*, *alternating copolymer*, *block copolymer* dan *graft polymer*.



Gambar 2.11 Tipe-tipe *copolymer* [25]

Polystyrene murni memiliki sifat yang getas. Untuk mendapatkan *polystyrene* yang kuat, maka dibutuhkan penambahan suatu senyawa kimia khusus. *Polybutadiene* merupakan salah satu tipe polimer yang terbentuk dari polimerisasi monomer 1-3, *butadiene*. Untuk mendapatkan *high-impact polystyrene* (HIPS), *polystyrene* dan *polybutadiene* haruslah dicampur melalui proses polimerisasi. Proses polimerisasi dipilih untuk menghindari timbulnya gaya intermolekular pada polimer yang tidak saling melarutkan. *Polybutadiene* yang dicampurkan harus memiliki ukuran yang sangat kecil.



Gambar 2.12 Kurva tegangan-regangan untuk *polystyrene* dan *high-impact polystyrene* [25]

Pada penelitian kali ini, material yang digunakan adalah *high-impact polystyrene* (HIPS). *High-impact polystyrene* telah terbukti memiliki nilai ketangguhan yang lebih tinggi daripada *polystyrene*, seperti pada gambar 2.10. Adapun bentuk HIPS yang digunakan adalah *foam* dengan massa jenis 45 kg/m^3 . Properti dari *high-impact polystyrene* dapat dilihat pada tabel 2.5



Gambar 2.13 *High-impact polystyrene* dalam bentuk *foam* [8]

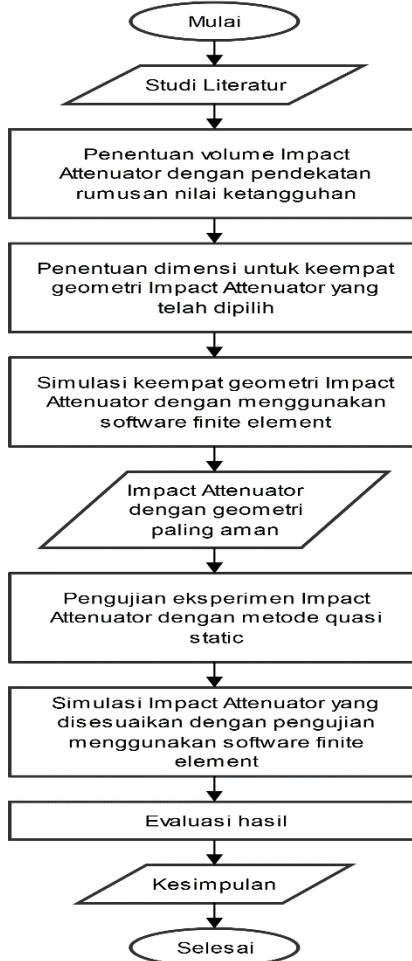
Tabel 2.5 Sifat mekanik *high-impact polystyrene*

Sifat Mekanik	
Massa jenis	45 kg/m ³
Konduktivitas thermal	0.033 W/(m.K)
Modulus Young	3000 MPa
Kekuatan tarik	60 MPa
Poisson's ratio	0.34
Panas spesifik	1.3 kJ/(kg.K)



BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Skema Diagram Alir Penelitian.



3.1 Skema diagram alir penelitian

3.2 Metodologi Penelitian

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui dasar teori mengenai informasi yang berkaitan dengan penelitian. Dasar teori berkaitan dengan :

1. Polystyrene

Dasar teori mengenai *polystyrene* meliputi sifat mekanik dan kelebihan dibandingkan material lain yang biasa digunakan sebagai *impact attenuator* kendaraan formula serta penjelasan secara detail untuk aspek tertentu yang berkaitan dengan penelitian.

2. Impact Attenuator

Penjelasan mengenai *impact attenuator*, fungsi dan standar pengujian yang digunakan untuk mengetahui kemampuan *impact attenuator* menyerap energi *impact*.

Kajian pustaka berisi penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan *impact attenuator* maupun *frontal impact* kendaraan. Studi literatur yang dilakukan tidak hanya terkait terhadap material, namun juga mengenai hipotesa awal. Berdasarkan tinjauan pustaka, diperoleh beberapa hipotesis, antara lain:

- Kekuatan dan ketangguhan material *high-impact polystyrene* (HIPS) yang akan digunakan merupakan hal dasar yang perlu dipertimbangkan. Aspek ketangguhan material HIPS yang akan digunakan sebagai *impact attenuator* lebih diutamakan, mengingat fungsi dari *impact attenuator* adalah untuk menyerap energi.
- Massa jenis dan volume dari material *high-impact polystyrene* juga harus dipertimbangkan. Hal tersebut berkaitan dengan massa yang akan dihasilkan. Kejelian dalam menentukan massa jenis dan volume akan sangat berpengaruh.

- Geometri *impact attenuator* memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap kemampuan menyerap energi. Geometri dengan model tirus akan lebih tepat untuk dijadikan *impact attenuator*.

3.2.2 Simulasi Pengujian

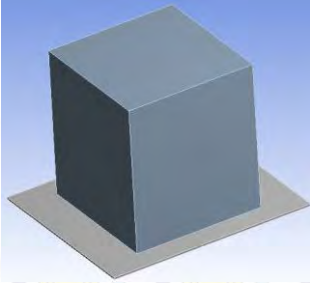
Simulasi pengujian dilakukan dengan software *finite element*. Simulasi terdiri dari beberapa tahap yaitu :

1. Proses penentuan geometri benda.
Geometri benda yang telah desain menggunakan software gambar 3D diimport ke dalam software *finite element*.
2. Proses input data material.
Data properti material dimasukkan ke dalam software melalui submenu *Engineering Data*.
3. Proses *Modelling*
Proses ini terdiri dari *meshing* dan *setting* kondisi sesuai dengan standar yang diinginkan. Setting kondisi untuk sistem *static structural* dilakukan dengan memberikan input berupa tekanan pada penampang *impact attenuator*.
4. Proses *Running* dan Hasil Simulasi
Setelah kondisi disesuaikan dengan standar yang diinginkan, dilakukan pemilihan data yang ingin dihasilkan. Untuk simulasi ini dipilih tegangan maksimal yang terjadi (*Von Mises Equivalent Stress*), energi yang dapat diserap dan deformasi. Proses simulasi dilakukan dengan melakukan *solve* untuk pengkondisian yang sudah ditetapkan.

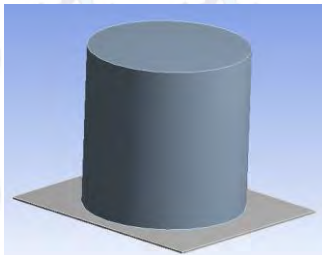
3.2.2.1 Proses Penentuan Geometri *Impact Attenuator*

Salah satu langkah awal dalam penelitian ini adalah penentuan geometri untuk *impact attenuator* yang akan digunakan. Terdapat empat macam geometri dari *impact attenuator* yang sering digunakan dalam kompetisi *Student Formula Japan*, yaitu

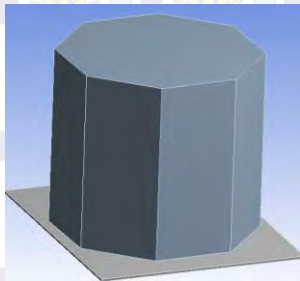
balok, tabung, prisma segidelapan dan piramida terpancung. Dalam penentuannya, selain kesesuaian dengan regulasi, faktor keamanan turut diperhatikan. Geometri dengan tingkat kemanan terbaik yang akan digunakan sebagai *impact attenuator*.



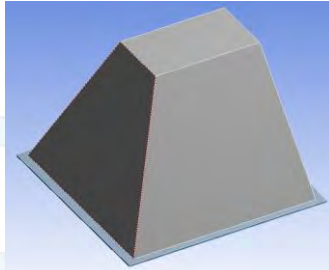
Gambar 3.2 *Impact attenuator* dengan geometri balok



Gambar 3.3 *Impact attenuator* dengan geometri tabung



Gambar 3.4 *Impact attenuator* dengan geometri prisma segidelapan



Gambar 3.5 *Impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung

3.2.2.2 Proses Input Data Material

Adapun material yang digunakan pada simulasi ini adalah *polystyrene* untuk *impact attenuator* dan *aluminium 6061* untuk *anti-intrusion plate*. Berikut properti dari *polystyrene* dan aluminium 6061:

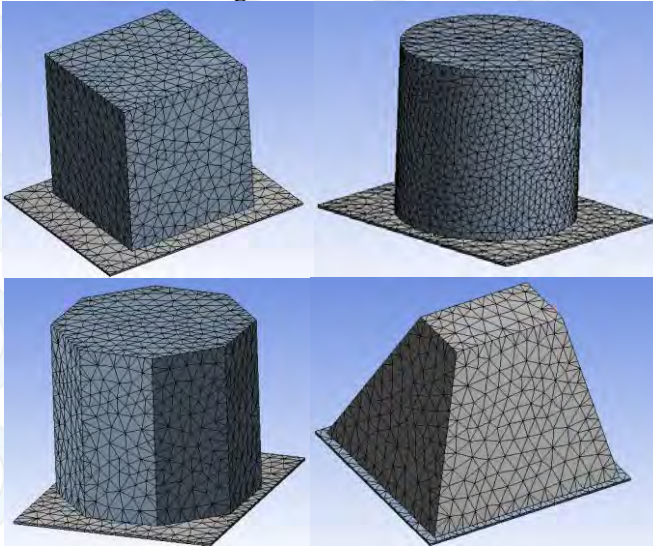
Tabel 3.1 Properti *polystyrene* [15;16]

Density (g/cc)	0.045
Elastic Modulus (MPa)	3000
Bulk Modulus (MPa)	3125
Shear Modulus (MPa)	1119.4
Poisson's Ratio	0.34
Tensile Strength (MPa)	60
Yield strength (MPa)	45.1

Tabel 3.2 Properti *aluminium 6061* [15;16]

Density (g/cc)	2.70
Elastic Modulus (MPa)	68900
Bulk Modulus (GPa)	67.5
Shear Modulus (GPa)	25.9
Poisson's Ratio	0.33
Tensile Strength (MPa)	310
Yield strength (MPa)	273

3.2.2.3 Proses Modelling

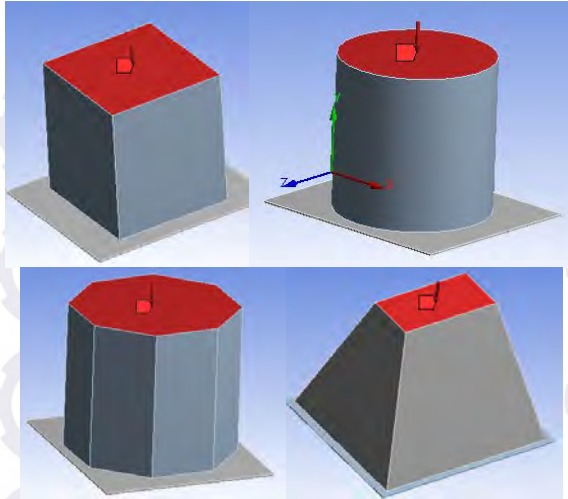


Gambar 3.6 Proses *meshing* keempat geometri *impact attenuator*

Gambar 3.6 di atas menunjukkan proses *meshing* yang dilakukan terhadap keempat geometri *impact attenuator*. Untuk jumlah elemen dan noda *mesh* pada masing-masing geometri dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.3 Jumlah elemen dan noda pada masing-masing geometri

Geometri <i>Impact Attenuator</i>	Jumlah Elemen	Jumlah Noda
Balok	7673	13597
Tabung	10821	19160
Prisma Segidelapan	7931	14124
Piramida Terpancung	5734	10691



Gambar 3.7 Proses pemberian *pressure* pada keempat geometri *impact attenuator*

Gambar 3.7 di atas menunjukkan proses dan letak pemberian *pressure* pada masing-masing geometri *impact attenuator* yang akan dievaluasi. *Pressure* yang diberikan sebesar 45.1 MPa, setara dengan nilai *ultimate yield strength* material *polystyrene*. Dengan *pressure* tersebut, kemudian akan ditinjau nilai tegangan ekuivalen masing-masing geometri untuk menentukan tingkat keamanannya.

3.2.3 Pengujian Eksperimen

3.2.3.1 Peralatan dan Bahan

- **Peralatan**

1. Mesin Uji Tarik-Tekan Shimadzu UH-I 500kH



Gambar 3.8 Mesin uji tarik-tekan Shimadzu UH-I 500kH

2. Alat Bantu : gerinda, gunting plat, peralatan las dan lem besi
 3. Alat Ukur : mistar dan jangka sorong
 4. Alat Keselamatan : sarung tangan dan pelindung wajah
- **Bahan Penyusun *Impact Attenuator***
 1. *Polystyrene*
 2. Plat aluminium dengan tebal 4 mm untuk *anti-intrusion plate*
 3. AISI 1030 berbentuk silinder dengan tebal 2 mm untuk representatif *bulkhead*

3.2.3.2 Langkah-langkah Pengujian

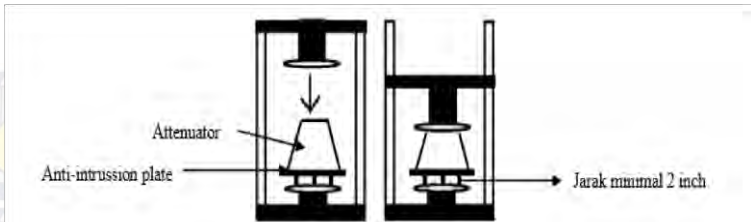
- **Penyusunan Spesimen Uji**

Spesimen uji yang digunakan pada percobaan ini terdiri dari *impact attenuator*, *anti-intrusion plate* dan representatif *bulkhead*. Adapun langkah-langkah penyusunannya sebagai berikut:

1. Plat aluminium dipotong dengan menggunakan gunting plat hingga terbentuk dimensi 380×320 mm
2. AISI 1030 berbentuk silinder dipotong dengan panjang 400 mm sebanyak 2 buah dan 320 mm sebanyak 2 buah
3. Plat aluminium sebagai *anti-intrusion plate* disatukan dengan AISI 1030 sebagai representatif *bulkhead* dengan menggunakan mur dan baut
4. *Anti-intrusion plate* disatukan dengan *impact attenuator* dengan menggunakan perekat lem besi.

- **Langkah Pengujian**

Pengujian eksperimen yang akan dilakukan mengacu pada standar pengujian *quasi-static* pada ASTM D-68. Pengujian menggunakan mesin uji tarik-tekan Shimadzu UH-I 500kH yang terdapat pada Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Teknik Sipil FTSP-ITS, mempertimbangkan ketersediaan alat dengan dimensi besar ruangan uji yang mampu ditempati oleh *impact attenuator*. Rencana pengujian dapat digambarkan melalui skema:



Gambar 3.9 Skema pengujian eksperimen *quasi-static* [6]

Adapun langkah-langkah pengujian yang akan dilakukan sebagai berikut:

1. Pemasangan spesimen uji pada mesin uji
2. Penambahan plat pada bagian atas spesimen uji, dengan tujuan gaya yang diberikan oleh mesin uji terdistribusi merata pada spesimen uji
3. Persiapan mesin uji dengan memasukkan input kecepatan sebesar 80 mm/ menit
4. Pemberian gaya pada spesimen uji hingga mencapai gaya maksimal
5. Spesimen uji diambil dari mesin uji
6. Pencatatan data hasil pengujian

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Penentuan Model dan Geometri *Impact Attenuator*

Sesuai dengan regulasi pada kompetisi *Student Formula Japan*, *impact attenuator* pada kendaraan harus dapat menyerap energi minimal sebesar 7350 J. Sedangkan dimensi dari *impact attenuator* dibatasi memiliki panjang minimal 200 mm, lebar minimal 200 mm dan tinggi minimal 100 mm. Melalui pendekatan rumusan untuk mencari nilai ketangguhan, volume dari *impact attenuator* untuk memenuhi persyaratan tersebut dapat diketahui.

$$\text{ketangguhan} = \frac{1}{2} \times \sigma \times \varepsilon \times V \dots \dots \dots (4.1)$$

dimana, σ : nilai kekuatan material *polystyrene*

ε : nilai regangan material *polystyrene*

V: volume dari *impact attenuator*

Dengan memasukkan data yang telah tertera pada *mechanical properties* material *polystyrene* maka akan didapatkan sebagai berikut:

$$\text{ketangguhan} = \frac{1}{2} \times \sigma \times \varepsilon \times V$$

$$7350 \text{ J} = \frac{1}{2} \times 60000000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 0.016 \times V$$

$$V = 0.0155 \text{ m}^3$$

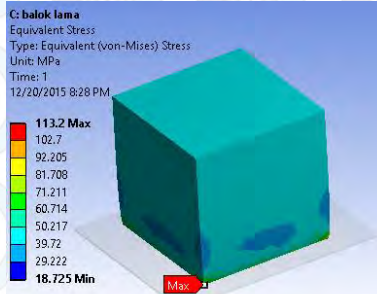
$$V = 15500 \text{ cm}^3$$

Didapatkan volume untuk *impact attenuator* sebesar 0.0155 m³. Keempat bentuk *impact attenuator* yang akan dipilih selanjutnya akan ditentukan dimensinya berdasarkan volume tersebut sebelum dilakukan simulasi pengujian.

Tabel 4.1 Dimensi tiap *impact attenuator*

Dimensi	Geometri <i>Impact Attenuator</i>			
	Balok	Tabung	Prisma Segidelapan	Piramida Terpancung
Panjang	27 cm	27 cm	27 cm	27 cm
Lebar	24 cm	26.8 cm	28.6 cm	35 cm
Tinggi	24 cm	26.8 cm	28.6 cm	10 cm

Berdasarkan dimensi tersebut, setiap geometri *impact attenuator* akan dievaluasi dengan menggunakan *software* Ansys Workbench 15. Adapun proses evaluasi melalui *static structural test*. Gambar dan tabel di bawah akan menampilkan hasil dari pengujian tersebut.



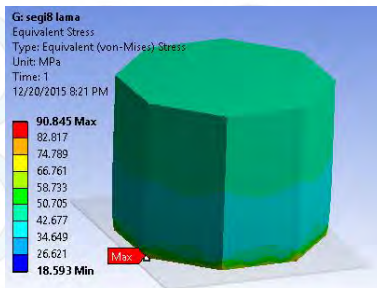
Gambar 4.1 Hasil simulasi pemilihan geometri *static structural* untuk *impact attenuator* dengan geometri balok

Dari hasil simulasi diketahui bahwa nilai tegangan von mises maksimal untuk *impact attenuator* dengan geometri balok adalah 113.2 MPa. Tegangan maksimal terjadi pada daerah yang mengalami kontak langsung dengan *anti-intrusion plate*. Adapun posisi *probe max* seperti pada gambar 4.1.



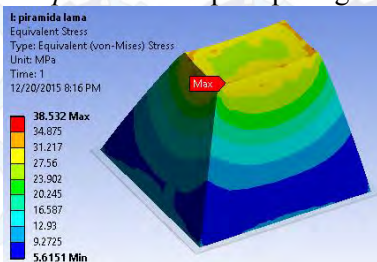
Gambar 4.2 Hasil simulasi pemilihan geometri *static structural* untuk *impact attenuator* dengan geometri tabung

Dari hasil simulasi diketahui bahwa nilai tegangan von mises maksimal untuk *impact attenuator* dengan geometri tabung adalah 78.215 MPa. Tegangan maksimal terjadi pada daerah yang mengalami kontak langsung dengan *anti-intrusion plate*. Adapun posisi *probe max* seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.3 Hasil simulasi pemilihan geometri *static structural* untuk *impact attenuator* dengan geometri prisma segidelapan

Dari hasil simulasi diketahui bahwa nilai tegangan von mises maksimal untuk *impact attenuator* dengan geometri prisma segidelapan adalah 90.845 MPa. Tegangan maksimal terjadi pada daerah yang mengalami kontak langsung dengan *anti-intrusion plate*. Adapun posisi *probe max* seperti pada gambar 4.3.



Gambar 4.4 Hasil simulasi pemilihan geometri *static structural* untuk *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung

Dari hasil simulasi diketahui bahwa nilai tegangan von mises maksimal untuk *impact attenuator* dengan geometri

piramida terpancung adalah 38.532 MPa. Tegangan maksimal terjadi pada daerah yang mengalami kontak langsung dengan input *pressure* yang diberikan. Adapun posisi *probe max* seperti pada gambar 4.4.

Tabel 4.2 Hasil evaluasi *static structural impact attenuator*

Geometri <i>Impact Attenuator</i>	Nilai Tegangan Ekuivalen (MPa)	Keterangan
Balok	113.2	Tidak aman
Tabung	78.215	Tidak aman
Prisma Segidelapan	90.845	Tidak aman
Piramida Terpancung	38.532	Aman

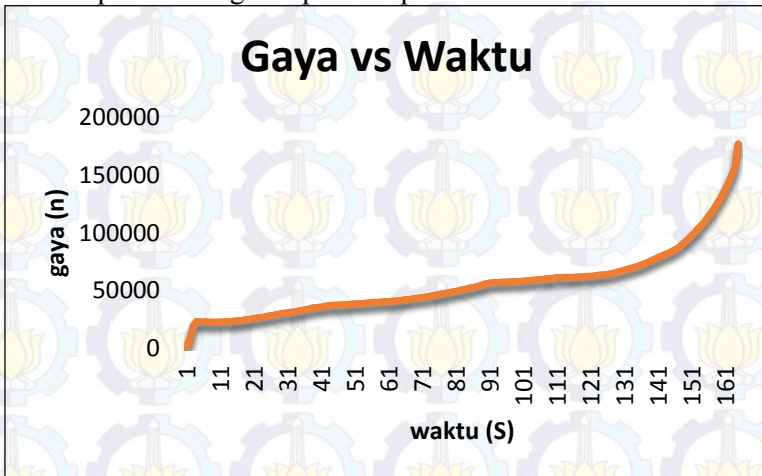
Tabel 4.2 menunjukkan nilai tegangan ekuivalen masing-masing geometri *impact attenuator* setelah dilakukan simulasi. *Impact attenuator* dengan geometri balok, tabung dan prisma segidelapan dinyatakan tidak aman dikarenakan nilai tegangan ekuivalen yang terjadi melebihi dari batas *yield material*, yaitu 45.1 MPa. Sedangkan untuk *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung dinyatakan aman karena memiliki tegangan ekuivalen yang masih dalam batas disarankan, yaitu 38.532 MPa.

Berdasarkan hasil simulasi untuk aspek geometri, dapat diambil kesimpulan bahwa geometri *impact attenuator* terbaik adalah piramida terpancung. *Impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung tersebut memiliki panjang 27 cm, lebar 35 cm dan tinggi 10 cm. Dengan geometri tersebut selanjutnya *impact attenuator* akan dilakukan pengujian eksperimen dan simulasi untuk menghasilkan *impact attenuator* yang dapat digunakan pada kompetisi *Student Formula Japan*.

4.2 Hasil Pengujian Eksperimen *Impact Attenuator*

Pengujian eksperimen *impact attenuator* dilaksanakan sesuai dengan standar ASTM D-68 tentang uji *quasi-static*. Pengujian

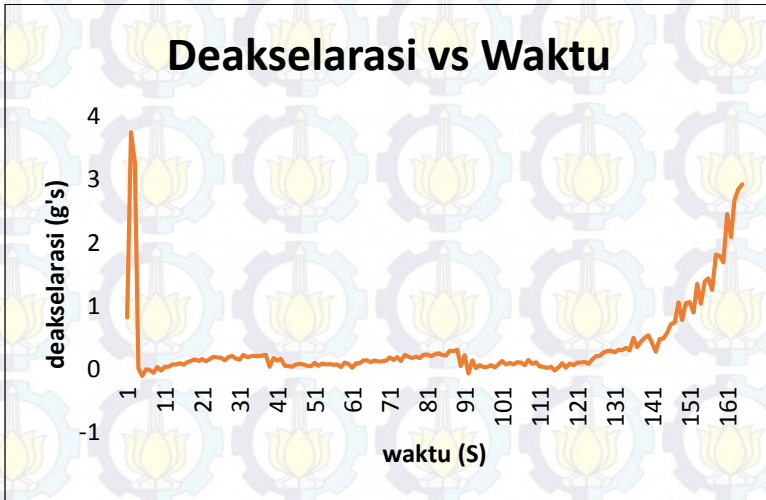
dilakukan di laboratorium beton dan bahan bangunan jurusan teknik sipil ITS dengan input kecepatan 80 mm/mn.



Gambar 4.5 Grafik gaya vs waktu saat pengujian eksperimen *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancing

Dari gambar 4.5 didapatkan adanya peningkatan gaya yang diberikan pada *impact attenuator* saat dilakukan pengujian *quasi-static*. Besarnya gaya yang diberikan pada *impact attenuator* dipantau tiap detik melalui data yang ditampilkan pada mesin pengujian. Adapun gaya maksimal yang diberikan senilai 177266 N pada detik ke 165. Dari gambar 4.5 juga terlihat adanya peningkatan gaya yang signifikan pada 2 interval waktu yang berbeda. Peningkatan gaya yang signifikan pertama terjadi pada interval waktu 150 – 160 detik, dari 98500 N pada detik ke 150 menjadi 138969 N pada detik ke 160. Fenomena tersebut terjadi karena mulai timbulnya retakan pada material *polystyrene* yang digunakan sebagai penyusun *impact attenuator*, seperti terlihat pada gambar 4.7. Sedangkan yang kedua terjadi pada interval waktu 160 – 165 detik, dimana terjadi peningkatan gaya dari 138969 N pada detik ke 160 menjadi 177266 N pada detik 165. Pada waktu tersebut, retakan yang awalnya timbul telah menjalar

hingga bagian dasar *impact attenuator* dan menyentuh *anti-intrusion plate*, seperti terlihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.6 Nilai deakselerasi tiap detik saat pengujian eksperimen *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung

Grafik pada gambar 4.6 di atas didapatkan dari tabel yang terdapat pada lampiran yang merupakan pendekatan melalui perhitungan manual berdasarkan data yang didapatkan dari pengujian. Berdasarkan rumusan $F = m \times a$, dimana m adalah massa kendaraan maksimum yang diizinkan (300 kg), maka nilai perlambatan dapat diperoleh. Sedangkan nilai F didapat dari selisih gaya yang diberikan tiap detik. Dari gambar 4.6 didapatkan adanya peningkatan deakselerasi yang terjadi pada *impact attenuator* saat dilakukan pengujian *quasi-static*. Proses deakselerasi berhenti pada detik ke 165, sejalan dengan gaya maksimum yang diberikan pada *impact attenuator*. Berdasarkan gambar 4.6 tersebut, deakselerasi maksimum yang terjadi sebesar 3.75 g's atau 36.8 m/s². Sedangkan rata-rata deakselerasi yang terjadi adalah m/s² atau 0.36 g's atau 3.53 m/s². Regulasi pada *Student Formula Japan*

menjelaskan bahwa deakselerasi yang diizinkan terjadi pada *impact attenuator* adalah 40 g's untuk maksimum deakselerasi dan 20 g's untuk maksimum deakselerasi rata-rata. Berdasarkan regulasi tersebut, *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung dan berbahan dasar *polystyrene* ini dapat dinyatakan memenuhi syarat.



Gambar 4.7 Retakan yang terjadi pada *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung saat pengujian eksperimen



Gambar 4.8 Deformasi yang terjadi *anti-intrusion plate* setelah dilakukan pengujian eksperimen pada *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung

Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa timbulnya retakan pada *impact attenuator* terjadi di dekat penjuru geometrinya. Awal retakan tersebut kemudian menjalar hingga bagian dasar *impact attenuator* dan menyentuh *anti-intrusion plate*, seperti terlihat pada

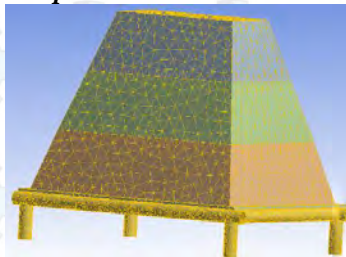
gambar 4.7. Daerah yang mengalami retakan tersebut merupakan sisi *anti-intrusion plate* yang mengalami deformasi. Regulasi pada *Student Formula Japan* yang lain mengatur tentang deformasi maksimum yang diizinkan terjadi pada *anti-intrusion plate* dari *impact attenuator* yaitu sebesar 1 inch atau 2.54 cm. Gambar 4.8 didapatkan bahwa pengukuran deformasi yang terjadi pada *anti-intrusion plate* menunjukkan angka 1.5 cm atau 15 mm, sehingga dapat dikatakan memenuhi regulasi tersebut.

Tabel 4.3 Hasil pengujian eksperimen *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung

Pengujian Eksperimen	
Ketentuan	Nilai
Gaya Maksimal yang Diberikan (N)	177265.6
Energi Maksimal yang Diserap (J)	12403.1
Perlambatan Maksimal (batas maksimum 40 g's)	3.75
Perlambatan Rata-rata (batas maksimum 20 g's)	0.36
Deformasi <i>Anti-intrusion Plate</i> (batas maksimum 25.4 mm)	15

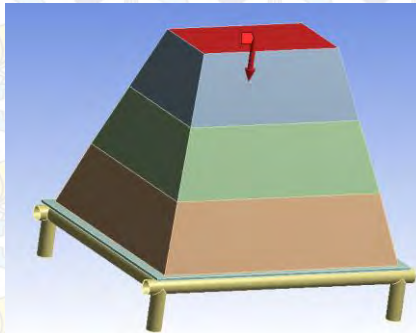
Tabel 4.3 di atas menunjukkan hasil pengujian eksperimen *impact attenuator* dengan metode *quasi-static*. Berdasarkan hasil tersebut, kesimpulan yang diperoleh adalah *impact attenuator* yang diuji dapat diaplikasikan pada kendaraan Sapuangin Speed.

4.3 Hasil Simulasi *Impact Attenuator*



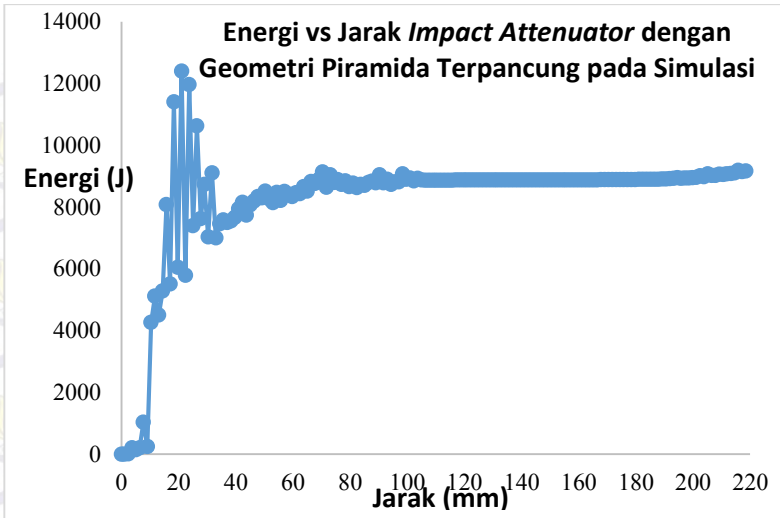
Gambar 4.9 *Meshing impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung untuk proses simulasi

Pada gambar 4.9 menunjukkan *meshing impact attenuator* sebelum dilakukan proses pemberian gaya pada simulasi. Nampak adanya perbedaan *meshing* antara gambar 4.9 dengan gambar 3.6, dikarenakan geometri *impact attenuator* untuk simulasi yang kedua menyesuaikan dengan geometri *impact attenuator* yang diuji dengan menggunakan metode *quasi-static*. Geometri *impact attenuator* yang diuji terdiri atas 3 susun lapisan yang menghasilkan bentuk piramida terpancung. Jumlah elemen yang dihasilkan dari *meshing* pada gambar 4.9 adalah 12191 elemen dengan rincian 2544 elemen pada bagian yang berwarna biru, 3935 elemen pada bagian berwarna hijau dan 5712 elemen pada bagian yang berwarna merah. Sedangkan *anti-intrusion plate* memiliki total 8919 eelemen.

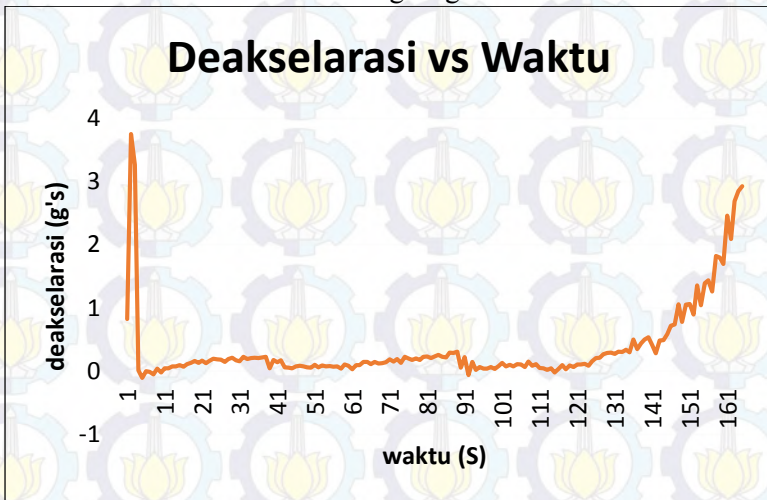


Gambar 4.10 Proses pemberian gaya pada *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung saat proses simulasi

Pada gambar 4.10 dapat dilihat proses pemberian gaya saat simulasi *impact attenuator*. Adapun gaya yang diberikan sesuai dengan gaya yang diberikan saat proses pengujian eksperimen seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5 sebelumnya.



Gambar 4.11 Proses penyerapan energi pada *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung selama proses simulasi berlangsung

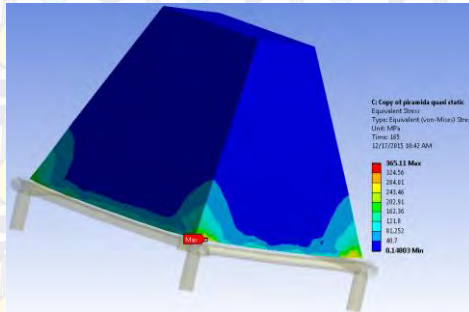


Gambar 4.12 Nilai deakselerasi tiap detik pada *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancungsaat proses simulasi

Pada gambar 4.11 di atas, didapatkan energi yang diserap selama proses simulasi berlangsung. Penyerapan energi maksimal terjadi pada jarak ke 22 mm dengan nilai 12405 J. Pada gambar 4.11 juga terlihat adanya 2 tren grafik. Tren grafik pertama terjadi pada jarak ke 0 mm sampai 22 mm yang merupakan tren grafik naik. Pada selang waktu tersebut, *impact attenuator* masih memiliki kekakuan, sehingga energi yang diserap tanpa menyebabkan deformasi plastis juga besar dan cenderung naik. Sedangkan pada jarak ke 22 mm hingga 219 mm menunjukkan tren grafik yang menurun. Pada selang waktu tersebut, *impact attenuator* sudah tidak lagi memiliki kekakuan dan mulai mengalami deformasi plastis. Akibatnya nilai energi yang diserap tanpa menyebabkan deformasi plastis cenderung turun.

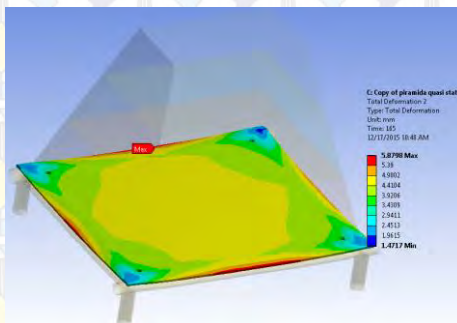
Gambar 4.12 di atas menunjukkan nilai deakselerasi yang dihasilkan *impact attenuator* selama proses simulasi. Proses perhitungan nilai deakselerasi dilakukan secara manual karena pada *software Ansys Workbench Static Structural* tidak dapat meninjau besarnya nilai deakselerasi. Perhitungan yang dilakukan serupa dengan perhitungan deakselerasi pada pengujian eksperimen. Dengan menggunakan rumusan $F = m \times a$, dimana m adalah massa kendaraan maksimum yang diizinkan (300 kg), maka nilai perlambatan dapat diperoleh. Sedangkan nilai F didapat dari selisih gaya yang diberikan tiap detik. Dari gambar 4.6 didapatkan adanya peningkatan deakselerasi yang terjadi pada *impact attenuator* saat dilakukan pengujian *quasi-static*. Proses deakselerasi berhenti pada detik ke 165, sejalan dengan gaya maksimum yang diberikan pada *impact attenuator*. Berdasarkan gambar 4.6 tersebut, deakselerasi maksimum yang terjadi sebesar 3.75 g's atau 36.8 m/s^2 . Sedangkan rata-rata deakselerasi yang terjadi adalah m/s^2 atau 0.36 g's atau 3.53 m/s^2 . Regulasi pada *Student Formula Japan* menjelaskan bahwa deakselerasi yang diizinkan terjadi pada *impact attenuator* adalah 40 g's untuk maksimum deakselerasi dan 20 g's untuk maksimum deakselerasi rata-rata. Berdasarkan regulasi tersebut, *impact attenuator* dengan

geometri piramida terpancung dan berbahan dasar *polystyrene* ini dapat dinyatakan memenuhi syarat.



Gambar 4.13 Nilai tegangan ekuivalen *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung setelah proses simulasi

Pada gambar 4.13 di atas, dapat disaksikan bahwa bagian ujung geometri dari *impact attenuator* cenderung menghasilkan nilai tegangan ekuivalen yang lebih besar dari sekitarnya. Adapun untuk daerah yang menghasilkan tegangan ekuivalen maksimal ditunjukkan dengan *probe max* dengan nilai 365.11 MPa. Sedangkan tegangan ekuivalen minimal terletak pada daerah yang tidak mengalami kontak langsung dengan *anti-intrusion plate*.



Gambar 4.14 Nilai deformasi pada *anti-intrusion plate impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung setelah proses simulasi

Pada gambar 4.14, didapatkan deformasi yang terjadi pada *anti-intrusion plate*. Bagian *anti-intrusion plate* yang tidak bersinggungan langsung dengan kaki meja/ kaki *bulkhead* mengalami deformasi yang lebih besar dibandingkan daerah sekitarnya. Sedangkan bagian yang bersinggungan langsung dengan kaki meja/ kaki *bulkhead* mengalami deformasi yang paling kecil. Nilai dari deformasi maksimal pada *anti-intrusion plate* di atas adalah 5.8798 mm.

Tabel 4.4 Hasil simulasi *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung

Pengujian Eksperimen	
Ketentuan	Nilai
Gaya Maksimal yang Diberikan (N)	177265.6
Energi Maksimal yang Diserap (J)	12405
Perlambatan Maksimal (batas maksimum 40 g's)	3.75
Perlambatan Rata-rata (batas maksimum 20 g's)	0.36
Deformasi <i>Anti-intrusion Plate</i> (batas maksimum 25.4 mm)	5.8798

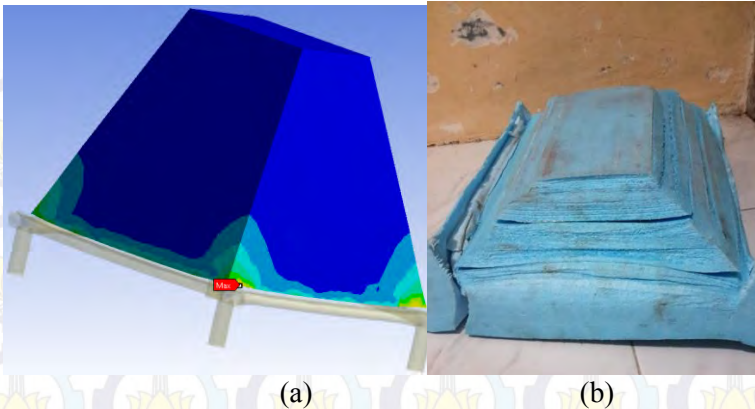
Tabel 4.4 di atas menunjukkan hasil simulasi *impact attenuator* dengan metode *quasi-static*. Berdasarkan hasil tersebut, kesimpulan yang diperoleh adalah *impact attenuator* yang diuji tidak dapat diaplikasikan pada kendaraan Sapuangan Speed dikarenakan tidak memenuhi persyaratan perlambatan maksimal yang diizinkan.

4.4 Komparasi Hasil Pengujian Eksperimen dan Simulasi

Tabel 4.5 Komparasi hasil pengujian eksperimen dan simulasi *impact attenuator*

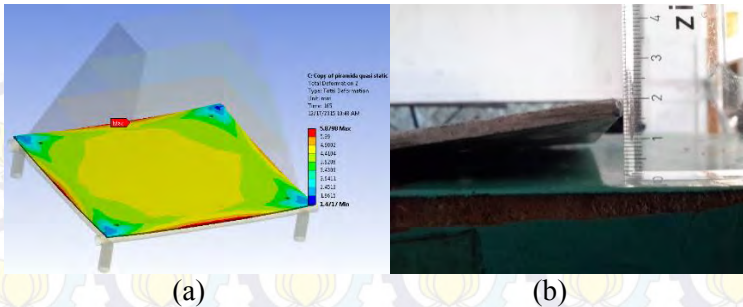
Metode	Energi (J)	Deakselerasi (g's)		Deformasi <i>Anti-Intrusion Plate</i> (mm)
		Maksimum	Rata-Rata	
Pengujian Eksperimen	12403.1	3.75	0.36	15
Simulasi <i>Finite Element Method</i>	12405	3.75	0.36	5.8

Pada tabel 4.5 di atas didapatkan perbandingan antara hasil pengujian eksperimen dan simulasi untuk *impact attenuator*. Untuk energi yang diserap, pada pengujian eksperimen menunjukkan nilai 12403.1 J, sedangkan pada simulasi menghasilkan energi sebesar 12405 J. Dapat dikatakan bahwa nilai energi yang dihasilkan keduanya tidak terlalu banyak terdapat perbedaan. Perbedaan energi yang dapat diserap hanya senilai 2 J, atau kurang dari 1 %. Perbedaan yang terjadi disebabkan perbedaan kondisi pada saat simulasi dan pengujian eksperimen. Pada saat simulasi, hal yang berpengaruh hanya *boundary condition* dan *properties* material. Sementara pada pengujian eksperimen, hal yang berpengaruh tidak hanya *boundary condition* dan *properties* material, namun juga kemampuan dan kondisi mesin penguji serta kondisi material.



Gambar 4.15(a) Letak tegangan ekuivalen maksimum pada simulasi (b) Bentuk *impact attenuator* setelah dilakukan pengujian

Pada proses simulasi, tegangan ekuivalen maksimum yang terjadi pada *impact attenuator* menunjukkan nilai sebesar 365.11 MPa. Sedangkan nilai *yield* dari material *polystyrene* sebesar 45.1 MPa. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa terjadi kegagalan pada *impact attenuator*. Adapun pada pengujian eksperimen, *impact attenuator* mengalami penyusutan ketinggian dan hancur seperti nampak pada gambar 4.15 (b) dan dapat dikatakan mengalami kegagalan. Hal tersebut sesuai dengan hasil simulasi, dimana tegangan ekuivalen yang terjadi melebihi tegangan *yield* material *polystyrene*.



Gambar 4.16 (a) Deformasi *anti-intrusion plate* pada saat simulasi (b) Deformasi *anti-intrusion plate* pada saat pengujian eksperimen

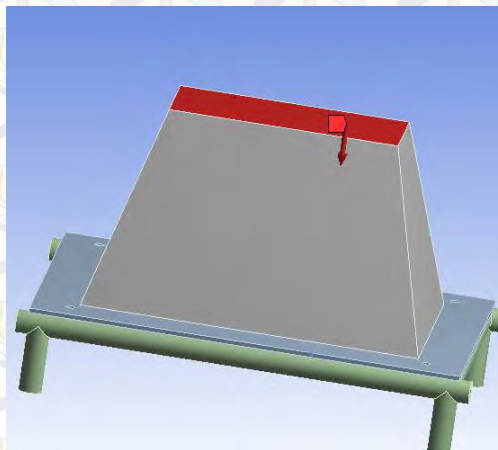
Pada gambar 4.16 (a), didapatkan deformasi pada *anti-intrusion plate* terjadi di bagian belakang dengan nilai 5.8798 mm atau 0.58798 cm. Sementara pada pengujian eksperimen, deformasi pada *anti-intrusion plate* terjadi di bagian belakang dengan nilai 15 mm atau 1.5 cm. Hasil yang didapatkan dari simulasi dan pengujian eksperimen menunjukkan adanya perbedaan. Hal ini disebabkan pada proses pengujian eksperimen, proses pemotongan lembaran aluminium menjadi *anti-intrusion plate* dilakukan secara manual menggunakan gunting plat. Sehingga kemungkinan terjadi takikan cukup besar. Selain itu, lembaran aluminium yang digunakan merupakan sisa yang dimiliki oleh tim, sehingga kemungkinan adanya deformasi awal juga cukup besar meskipun nilainya kecil.

4.5 Studi Lanjut *Impact Attenuator* dengan Material *Polystyrene* dan Geometri Piramida Terpancung

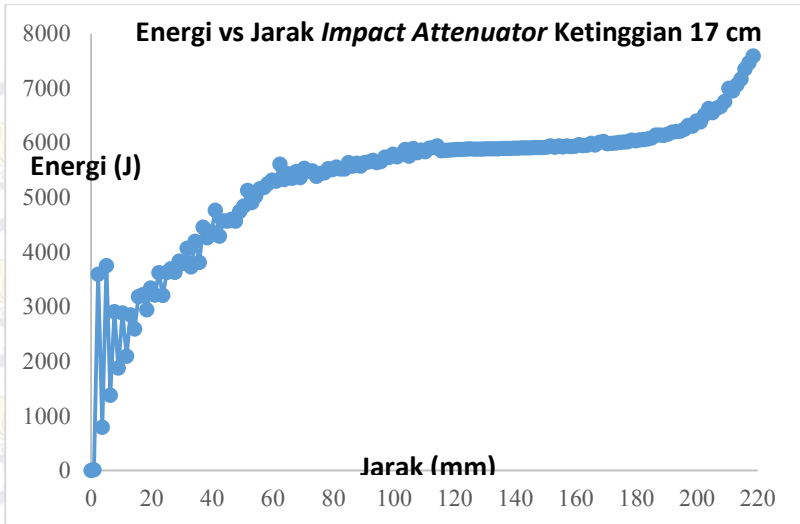
Berdasarkan hasil pengujian eksperimen dan simulasi, didapatkan nilai serapan energi yang telah memenuhi persyaratan *Student Formula Japan* sebesar 7350 J. Besarnya energi yang diserap pada pengujian eksperimen sebesar 12403.1 J dan pada

simulasi sebesar 12405 J. Nilai energi yang diserap tersebut termasuk sangat besar jika dibandingkan dengan yang tertera pada regulasi. Hal tersebut salah satunya diakibatkan oleh ukuran dari *impact attenuator*. Dimensi *impact attenuator* yang digunakan adalah $27 \times 35 \times 10$ cm untuk panjang \times lebar \times tinggi. Sementara regulasi mengatur bahwa dimensi minimal *impact attenuator* adalah $20 \times 20 \times 10$ cm. Oleh sebab itu, studi lanjut tentang *impact attenuator* ini dirasa perlu dilakukan untuk menjadikan *impact attenuator* lebih ringan namun masih memenuhi regulasi.

Pada tabel pengujian eksperimen yang terletak pada lampiran, didapatkan bahwa untuk dapat menghasilkan *impact attenuator* yang mampu menyerap energi minimal 7350 J adalah pada detik ke 128 dengan nilai gaya 66093.75 N dan *stroke* 170.392 mm. Dapat diartikan bahwa *impact attenuator* dengan material *polystyrene* dan geometri piramida terpancung hanya membutuhkan panjang 17 cm untuk dapat dinyatakan memenuhi regulasi serapan energi. Sehingga diperoleh dimensi baru yang sesuai dengan hasil pengujian eksperimen yaitu $17 \times 22 \times 10$ cm.



Gambar 4.17 Proses pemberian gaya pada *impact attenuator* dengan dimensi $17 \times 22 \times 10$ cm untuk studi lanjut

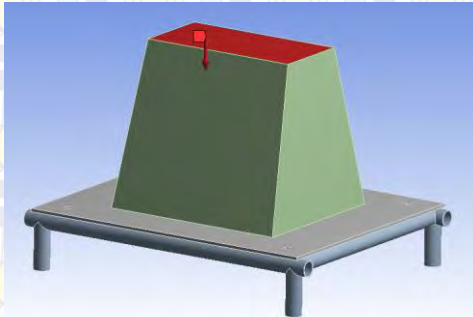


Gambar 4.18 Proses penyerapan energi selama simulasi berlangsung pada *impact attenuator* dengan dimensi $17 \times 22 \times 10$ cm untuk studi lanjut

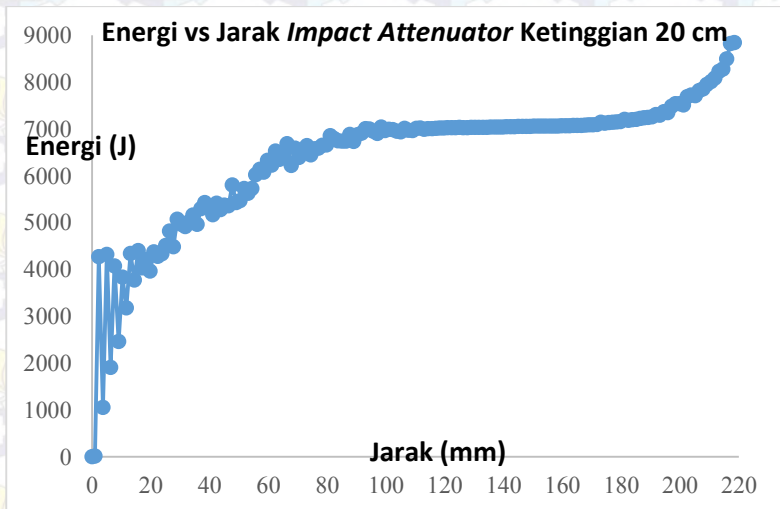
Gambar 4.17 di atas menunjukkan proses pemberian gaya pada *impact attenuator* baru yang memiliki dimensi $17 \times 22 \times 10$ cm. Sedangkan pada gambar 4.18 menunjukkan proses penyerapan energi *impact attenuator* selama simulasi berlangsung. Dari gambar 4.18 didapatkan bahwa energi yang mampu diserap maksimal sebesar 7586 J. Sementara berdasarkan hasil pengujian eksperimen didapatkan bahwa pada jarak penekanan 17 cm, energi yang mampu diserap maksimal sebesar 7399.8 J. Perbedaan nilai energi ini disebabkan pada simulasi, hal yang berpengaruh hanya *boundary condition* dan geometri. Sementara pada pengujian eksperimen, selain dua hal tersebut, kondisi mesin uji juga turut berpengaruh terhadap hasil pengujian. Adapun jika menggunakan *impact attenuator* dengan dimensi ini, beratnya 0.27 kg.

Studi lanjut berikutnya dilakukan untuk mengetahui nilai serapan energi jika *impact attenuator* dengan menggunakan *polystyrene* dan geometri piramida terpancung didesain dengan

dimensi minimal sesuai dengan regulasi *Student Formula Japan* yaitu $20 \times 20 \times 10$ cm. Adapun pemberian beban pada simulasi sesuai dengan beban yang diberikan pada pengujian eksperimen.



Gambar 4.19 Proses pemberian gaya pada *impact attenuator* dengan dimensi $20 \times 20 \times 10$ cm untuk studi lanjut



Gambar 4.20 Proses penyerapan energi selama simulasi berlangsung pada *impact attenuator* dengan dimensi $20 \times 20 \times 10$ cm untuk studi lanjut

Gambar 4.19 di atas menunjukkan proses pemberian gaya pada *impact attenuator* baru yang memiliki dimensi $20 \times 20 \times 10$ cm. Sedangkan pada gambar 4.20 menunjukkan proses penyerapan energi *impact attenuator* selama simulasi berlangsung. Dari gambar 4.20 didapatkan bahwa energi yang mampu diserap maksimal sebesar 8844 J. Sementara berdasarkan hasil pengujian eksperimen sebelumnya, didapatkan energi yang mampu diserap maksimal sebesar 12403.1 J. Berdasarkan hal tersebut, maka proses manufaktur *impact attenuator* dengan material *polystyrene* dan geometri piramida terpancung dapat dirubah dimensinya. Dengan dimensi $20 \times 20 \times 10$ cm, *impact attenuator* ini telah memenuhi regulasi tentang nilai serapan energi sebesar 8844 J. *Impact attenuator* dengan dimensi ini memiliki berat 0.29 kg.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. *Impact attenuator* yang terbuat dari material *polystyrene* dengan geometri piramida terpancung memiliki kemampuan menyerap energi yang tinggi. Pada simulasi, jumlah energi yang dapat diserap sebesar 12405 J, sedangkan pada pengujian eksperimen jumlah energi yang dapat diserap sebesar 12403.1 J. Berat dari *impact attenuator* adalah 0.7 kg.
2. *Impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung memiliki dimensi panjang 27 cm, lebar 35 cm dan tinggi 10 cm (pada regulasi *Student Formula Japan*, *impact attenuator* harus memiliki dimensi minimum panjang 20 cm, lebar 20 cm dan tinggi 10 cm dalam kondisi terpasang pada *front bulkhead* kendaraan). Perlambatan maksimum yang terjadi pada *impact attenuator* ini sebesar 3.75 g's dan rata-rata perlambatan sebesar 0.36 g's (pada regulasi *Student Formula Japan* disebutkan bahwa perlambatan yang terjadi pada *impact attenuator* maksimum sebesar 40 g's dan rata-rata maksimum yang diizinkan sebesar 20 g's). Defleksi yang terjadi pada *anti-intrusion plate* sebesar 15 mm saat dilakukan pengujian eksperimen dan 5.8 mm saat dilakukan simulasi (pada regulasi *Student Formula Japan* defleksi maksimum yang diizinkan terjadi pada *anti-intrusion plate* sebesar 1 inch atau 25.4 mm).
3. *Impact attenuator* yang terbuat dari material *polystyrene* dengan geometri piramida terpancung ini dinyatakan dapat digunakan pada kendaraan Sapuangin Speed.

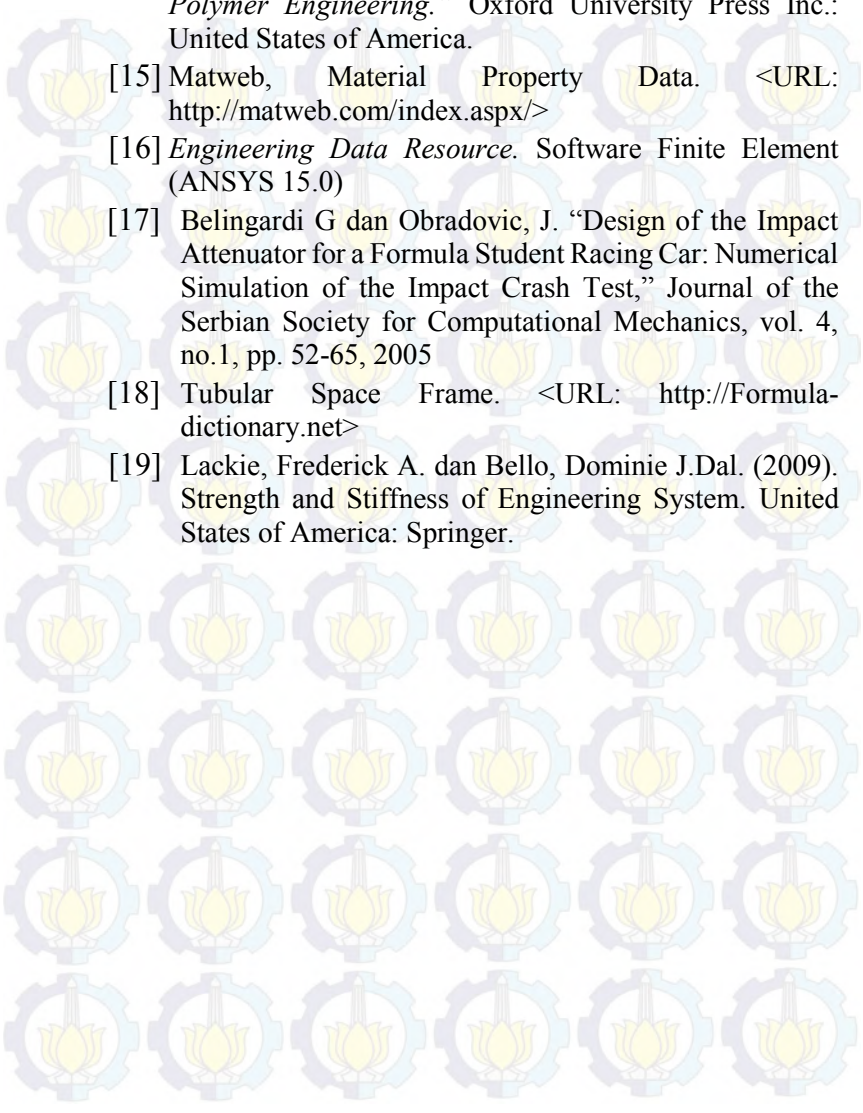
5.2 Saran

Saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan *polystyrene foam* terbukti dapat menyerap energi yang besar. Sehingga *polystyrene foam* ataupun *foam* yang lain disarankan untuk digunakan ataupun ditambahkan sebagai penguat *impact attenuator*.
2. *Impact attenuator* dengan material *polystyrene* dan geometri piramida terpancung berdimensi $20 \times 20 \times 10$ cm disarankan untuk digunakan, karena dapat menyerap energi di atas 7350 J dan beratnya hanya 0.29 kg.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Callister, Jr. William.D. 2007. *Material Sciene And Engineering An Introduction*. John Wiley & Sons Inc: United States of America.
- [2] Chung, Deborah D.L.2010. *Composite Materials, Science and Applications*. Springer: United Kingdom.
- [3] Simonetta Boria, Silvia Pettinari. 2014. *Mathematical Design of Electrial Vehicle Impact Attenuuator*. Composite Structures 115 (2014) 51-59.
- [4] Jovan Obradovic, Simonetta Boria dan Giovanni Belingardi. 2011. "Lightweight Design and Crash Analysis of Composite Frontal Impact Energy Absorbing Structures". Composite Structures 94 (2012) 423-430.
- [5] Enomoto H, dkk. 2007. "Development Of CFRP Monocoque Front Impact Attenuator For FSAE With Vartm". Kanazawa University, KADO Corporation: Japan.
- [6] Akmal Irfan Maajid, Ahmad Khozi Arijuddin, Budi Santoso, IGB Budi Dharma. 2012. "Perancangan dan Pengujian Piranti Keselamatan Berkendara Impact Attenuator Pada Mobil Student Formula 600cc Bimasakti-UGM". ISBN No. 978-979-96964-3-9
- [7] <URL: <http://fsae.com/>>
- [8] <URL: <http://fsaeonline.com>>
- [9] <URL: <http://En.wikipedia.org/polymer>>
- [10] <URL: <http://En.wikipedia.org/wiki/Carbon-fiber-reinforced-polymer>>
- [11] <URL: <http://Formula1-dictionary.net>>
- [12] Economic commission of Europe. 1981. "*ECE R33*". Germany: Economic Commission of Europe.
- [13] SP System Composite Engineering Material

- 
- [14] McCrum, Bucknall, Buckley. 1996, "*Principles of Polymer Engineering.*" Oxford University Press Inc.: United States of America.
- [15] Matweb, Material Property Data. <URL: <http://matweb.com/index.aspx/>>
- [16] *Engineering Data Resource*. Software Finite Element (ANSYS 15.0)
- [17] Belingardi G dan Obradovic, J. "Design of the Impact Attenuator for a Formula Student Racing Car: Numerical Simulation of the Impact Crash Test," Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics, vol. 4, no.1, pp. 52-65, 2005
- [18] Tubular Space Frame. <URL: <http://Formula-dictionary.net>>
- [19] Lackie, Frederick A. dan Bello, Dominie J.Dal. (2009). Strength and Stiffness of Engineering System. United States of America: Springer.

LAMPIRAN

Tabel 1. Hasil pengujian eksperimen *impact attenuator* dengan geometri piramida terpancung

Waktu (s)	Gaya (N)	Jarak (mm)	Energi (J)	Deakselerasi (g's)
0	-93.75	0	0	0
1	2328.13	0.962	2.239656	0.822927285
2	13375	2.342	20.69716	3.753610262
3	22984.4	3.694	51.77204	3.265164798
4	23031.3	5.034	82.63391	0.015925926
5	22718.8	6.366	112.8953	-0.106184166
6	22718.8	7.686	142.884	0
7	22687.5	9.032	173.4214	-0.010618417
8	22531.3	10.366	203.4781	-0.053092083
9	22640.6	11.7	233.6807	0.037166157
10	22578.1	13.034	263.7999	-0.021236833
11	22703.1	14.374	294.2221	0.042473666
12	22828.1	15.702	324.5379	0.042473666
13	23046.9	17.034	355.2363	0.074328916
14	23265.6	18.366	386.2261	0.074328916
15	23546.9	19.702	417.6848	0.095565749
16	23750	21.038	449.4148	0.069018009
17	24078.1	22.374	481.5832	0.111495073
18	24468.8	23.706	514.1755	0.132728508
19	24937.5	25.03	547.1928	0.159276249
20	25328.1	26.364	580.9805	0.132731906

21	25812.5	27.702	615.5176	0.164583758
22	26187.5	29.028	650.2423	0.127420999
23	26671.9	30.372	686.0893	0.164587156
24	27250	31.692	722.0593	0.196439008
25	27796.9	33.034	759.3627	0.185823989
26	28328.1	34.368	797.1524	0.180513082
27	28750	35.692	835.2174	0.143346925
28	29312.5	37.038	874.672	0.191131498
29	29937.5	38.352	914.0099	0.212368332
30	30437.5	39.698	954.9788	0.169894665
31	30890.6	41.034	996.2487	0.153968739
32	31562.5	42.37	1038.416	0.228294258
33	32125	43.698	1081.078	0.191131498
34	32734.4	45.038	1124.942	0.207060822
35	33359.4	46.366	1169.243	0.212368332
36	33968.8	47.702	1214.626	0.207057424
37	34609.4	49.046	1261.141	0.217679239
38	35281.3	50.376	1308.065	0.228294258
39	35406.3	51.712	1355.368	0.042473666
40	35921.9	53.044	1403.215	0.175205573
41	36328.1	54.382	1451.823	0.138039416
42	36828.1	55.714	1500.878	0.169894665
43	37000	57.044	1550.088	0.058399592
44	37156.3	58.384	1599.877	0.053092083
45	37281.3	59.718	1649.61	0.042473666
46	37500	61.062	1700.01	0.074328916
47	37750	62.39	1750.142	0.084947333

48	37968.8	63.718	1800.565	0.074328916
49	38140.6	65.054	1851.521	0.05840299
50	38296.9	66.392	1902.762	0.053092083
51	38593.8	67.72	1954.014	0.100873259
52	38765.6	69.048	2005.495	0.05840299
53	39031.3	70.392	2057.953	0.090254842
54	39250	71.708	2109.606	0.074328916
55	39484.4	73.046	2162.436	0.079639823
56	39687.5	74.378	2215.3	0.069018009
57	39906.3	75.698	2267.976	0.074328916
58	40015.6	77.034	2321.437	0.037166157
59	40328.1	78.368	2375.235	0.106184166
60	40578.1	79.692	2428.96	0.084947333
61	40656.3	81.02	2482.952	0.026544343
62	40937.5	82.376	2538.463	0.095565749
63	41218.8	83.686	2592.459	0.095565749
64	41640.6	85.022	2648.091	0.143350323
65	42062.5	86.358	2704.287	0.143346925
66	42390.6	87.69	2760.751	0.111495073
67	42812.5	89.02	2817.692	0.143346925
68	43171.9	90.344	2874.851	0.12211349
69	43546.9	91.678	2932.943	0.127420999
70	43953.1	93.014	2991.664	0.138039416
71	44500	94.336	3050.493	0.185820591
72	44937.5	95.668	3110.35	0.148657832
73	45500	97.004	3171.138	0.191131498
74	45890.6	98.342	3232.54	0.132731906

75	46562.5	99.67	3294.375	0.228294258
76	47156.3	101.006	3357.375	0.201749915
77	47671.9	102.334	3420.684	0.175205573
78	48265.6	103.66	3484.684	0.201749915
79	48781.3	105	3550.051	0.175202175
80	49453.1	106.32	3615.329	0.228297655
81	50140.6	107.656	3682.317	0.233605165
82	50750	108.988	3749.916	0.207057424
83	51437.5	110.324	3818.636	0.233605165
84	52187.5	111.654	3888.046	0.254841998
85	52859.4	112.97	3957.609	0.228297655
86	53500	114.312	4029.406	0.217675841
87	54359.4	115.65	4102.139	0.292008155
88	55203.1	116.98	4175.559	0.286697248
89	56109.4	118.318	4250.633	0.307934081
90	56265.6	119.636	4324.791	0.053092083
91	56921.9	120.958	4400.042	0.222986748
92	56734.4	122.292	4475.726	-0.063710499
93	57156.3	123.648	4553.229	0.143346925
94	57218.8	124.966	4628.644	0.021236833
95	57406.3	126.288	4704.535	0.063710499
96	57515.6	127.624	4781.376	0.037166157
97	57625	128.958	4858.247	0.037162759
98	57812.5	130.282	4934.791	0.063710499
99	57906.3	131.61	5011.691	0.03185525
100	58140.6	132.942	5089.134	0.079639823
101	58531.3	134.3	5168.619	0.132728508

102	58750	135.642	5247.462	0.074328916
103	59046.9	136.984	5326.703	0.100876656
104	59265.6	138.312	5405.408	0.074328916
105	59593.8	139.626	5483.714	0.111491675
106	59906.3	140.984	5565.066	0.106184166
107	60093.8	142.332	5646.073	0.063710499
108	60531.3	143.668	5726.943	0.148657832
109	60781.3	144.988	5807.174	0.084947333
110	61109.4	146.348	5890.283	0.111495073
111	61250	147.672	5971.378	0.047781176
112	61375	149.014	6053.743	0.042473666
113	61437.5	150.354	6136.069	0.021236833
114	61562.5	151.68	6217.701	0.042473666
115	61500	153.022	6300.234	-0.021236833
116	61593.8	154.38	6383.878	0.03185525
117	61875	155.706	6465.925	0.095565749
118	61953.1	157.032	6548.074	0.02654774
119	62218.8	158.356	6630.452	0.090254842
120	62406.3	159.714	6715.2	0.063710499
121	62718.8	161.05	6798.992	0.106184166
122	63031.3	162.396	6883.832	0.106184166
123	63375	163.698	6966.346	0.116802582
124	63625	165.06	7053.003	0.084947333
125	64078.1	166.388	7138.099	0.153968739
126	64687.5	167.736	7225.298	0.207057424
127	65312.5	169.06	7311.772	0.212368332
128	66093.8	170.392	7399.809	0.265460415

129	66937.5	171.748	7490.576	0.286697248
130	67796.9	173.082	7581.017	0.292008155
131	68593.8	174.424	7673.07	0.270767924
132	69500	175.762	7766.061	0.307934081
133	70390.6	177.096	7859.962	0.302626572
134	71390.6	178.424	7954.769	0.339789331
135	72265.6	179.766	8051.749	0.297315664
136	73734.4	181.118	8151.438	0.499065579
137	74765.6	182.446	8250.727	0.350407747
138	76062.5	183.788	8352.803	0.440662589
139	77531.3	185.114	8455.609	0.499065579
140	79109.4	186.462	8562.248	0.536231736
141	80312.5	187.814	8670.831	0.408807339
142	81140.6	189.112	8776.151	0.281389738
143	82562.5	190.47	8888.271	0.483136256
144	84000	191.804	9000.327	0.488447163
145	85718.8	193.164	9116.905	0.584012912
146	87828.1	194.484	9232.838	0.716744818
147	90000	195.812	9352.358	0.737978253
148	93109.4	197.154	9477.311	1.056534149
149	95406.3	198.482	9604.01	0.78045192
150	98500	199.854	9739.152	1.051223242
151	101625	201.146	9870.452	1.061841658
152	104266	202.522	10013.92	0.897247706
153	108250	203.844	10157.03	1.353856609
154	111313	205.156	10303.07	1.040604825
155	115406	206.55	10463.95	1.391029562

156	119641	207.844	10618.76	1.438769963
157	123344	209.178	10783.3	1.258307849
158	128703	210.54	10958.6	1.82103296
159	133984	211.846	11133.58	1.794529392
160	138969	213.22	11324.52	1.69364594
161	146203	214.542	11517.8	2.458137954
162	152359	215.864	11719.22	2.091845056
163	160266	217.224	11937.18	2.686442406
164	168656	218.524	12156.44	2.851070336
165	177266	219.878	12403.1	2.925348284

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Gresik pada tanggal 18 Juli 1992 dengan nama **Najihun Ghulam Halim**. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu SD Semen Gresik (1999-2005), SMPN 1 Gresik (2005-2008), SMAN 1 Gresik (2008-2011). Selepas SMA penulis melanjutkan studinya di Jurusan S1 Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya.

Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. Petrokimia Gresik Departemen Inspeksi Teknik selama 1 bulan dengan tugas analisa kegagalan pada rumah pasak poros pompa.

Penulis aktif di berbagai kegiatan dalam kampus. Pada saat kuliah aktif sebagai pengurus di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) ITS. Prestasi yang pernah diraih antara lain Juara II Kontes Mobil Hemat Energi 2014 kategori *prototype gasoline*, juara I Shell Eco-Marathon Asia 2015 kategori *urban diesel* dan peringkat 4 Shell Eco-Marathon Asia 2015 kategori *prototype diesel*. Selain itu banyak pelatihan dan kegiatan yang diikutinya, baik kegiatan akademis maupun non-akademis selama menjadi mahasiswa aktif di lingkungan ITS.

Email : najihungh@gmail.com